

碳酸盐岩沉积储层研究前沿与未来发展方向

周进高^{1,2},徐哲航¹,黄世伟³,李文正^{1,2},段军茂¹,朱永进^{1,2},郑剑锋^{1,2},吴东旭^{1,2},常少英^{1,2}

(1. 中国石油 杭州地质研究院, 浙江 杭州 310023; 2. 中国石油集团公司 碳酸盐岩重点实验室, 浙江 杭州 310023;

3. 中国石油 大庆油田公司勘探事业部, 黑龙江 大庆 163714)

摘要:碳酸盐岩蕴藏着丰富的油气资源,是当前和未来油气勘探开发的重要领域。为明确碳酸盐岩沉积储层研究现状,指出未来发展趋势,通过文献调研,分析了碳酸盐岩研究前沿与未来发展方向,研究了国内外碳酸盐岩沉积、储层研究取得的进展。在碳酸盐岩沉积学领域的进展包括:①完善了碳酸盐工厂分类,明确了5类工厂的生产者、生产环境和产物之间的成生关系,为碳酸盐岩沉积环境恢复、源-储确定以及碳酸盐岩“源-汇”体系研究提供了新思路;②系统阐明了微生物造岩固碳、微生物造岩固碳、微生物诱导形成碳酸盐组构以及微生物参与沉积演化的机理,为重建地质历史时期碳循环、大气氧化和生物演化以及碳封存提供了新的理论依据;③建立了盆地级岩相古地理恢复及个性化沉积模式,推动了油气勘探向碳酸盐台地内部和深层-超深层古老碳酸盐岩领域拓展。在碳酸盐岩储层地质学领域的进展是:①创新白云石形成机理,建立了微生物诱导白云石化、溶蚀-沉淀驱动白云石化和高二氧化硅浓度驱动白云石化3种新模式,为破解“白云石问题”提供了新的理论模型;②阐明了沉积相、白云石化、溶蚀作用和构造改造是储层形成的主控因素,明确了微生物岩储层和断控储层形成与分布规律,推动碳酸盐岩油气勘探取得新突破。在碳酸盐岩实验技术方面的进展是:建立了碳酸盐岩矿物铀-铅(U-Pb)同位素定年技术及碳酸盐团簇同位素和Mg、S同位素测试技术,为储层孔隙演化、储层形成过程和成藏演化恢复提供了新的技术方法。研究认为,物理模拟、数值模拟和智能化是碳酸盐岩沉积储层及实验技术的未来发展方向。

关键词:实验技术;研究前沿;发展方向;储层地质学;沉积学;白云岩;微生物岩;碳酸盐岩

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Frontiers and trends in the research on carbonate sedimentology and reservoir geology

ZHOU Jingao^{1,2}, XU Zhehang¹, HUAN Shiwei³, LI Wenzheng^{1,2}, DUAN Junmao¹, ZHU Yongjin^{1,2}, ZHENG Jianfeng^{1,2},
WU Dongxu^{1,2}, CHANG Shaoying^{1,2}

[1. Hangzhou Research Institute of Geology, PetroChina, Hangzhou, Zhejiang 310023, China; 2. Key Laboratory of Carbonate Reservoirs, CNPC, Hangzhou, Zhejiang 310023, China; 3. Exploration Department, PetroChina Daqing Oilfield Company, Daqing, Heilongjiang 163453, China]

Abstract: Carbonate rocks typically contain abundant hydrocarbon resources, which establish them as a crucial target for current and future hydrocarbon exploration and exploitation. To determine the frontiers and trends of research on carbonate sedimentology and reservoir geology, we perform a literature review on carbonate rocks. The three advances in carbonate sedimentology are summarized here. (1) An improved classification of carbonate factories in five types is developed based on the determination of the genetic relationships between producers, environments, and products. These provide a novel philosophy for reconstructing carbonate sedimentary environments, localizing source rocks and reservoirs, and investigating the source-to-sink sedimentary system of carbonate rocks. (2) A systematic elucidation of the mechanisms behind carbon sequestration and oxygen generation by microbes, carbon sequestration and rock formation by microbes, microbially induced carbonate fabrics, and microbial involvement in sedimentation and evolution. These mechanisms function as a new theoretical basis for reconstructing the carbon cycling, atmospheric oxidation, biological evolution, and

收稿日期:2024-03-26;修回日期:2024-06-30。

第一作者简介:周进高(1967—),男,教授,硕士研究生导师,碳酸盐岩沉积储层及油气地质评价。E-mail:zhoujg_hz@petrochina.com.cn。

通信作者简介:黄世伟(1979—),男,高级工程师,油气地质研究和勘探项目综合管理工作。E-mail:huangshiwei@petrochina.com.cn。

基金项目:中国石油重大科技专项(2023ZZ16YJ01);中国石油天然气集团有限公司基础性前瞻性重大科技专项(2023ZZ02)。

carbon sequestration in geological history. (3) The basin-scale lithofacies paleogeographic reconstruction, and the development of unique sedimentary patterns. These allow for the expansion of hydrocarbon exploration toward both the interior carbonate platforms and deep to ultradeep ancient carbonate rocks. Recent advances in the understanding of carbonate reservoir geology include: (1) Innovations made in the genetic mechanisms of dolomites, with three novel models being established: microbially induced dolomitization, dissolution/precipitation-driven dolomitization, and high silica concentration-driven dolomitization, being of new theoretical models for understanding dolomitization; (2) The identification of sedimentary facies, dolomitization, dissolution, and structural modification as dominant factors controlling reservoir formation, and the determination of the formation and distribution patterns of microbialite-dominated reservoirs and fault-controlled reservoirs. These assist in expediting breakthroughs in oil and gas exploration in carbonate rocks. The advances in experimental techniques for carbonate rocks include the establishment of uranium and lead (U-Pb) isotopic dating, and clumped, Mg, and S isotope tests for carbonate minerals. These advances provide new technologies and methods for reconstructing the evolution of reservoir porosity, the process of reservoir formation, and the evolution of hydrocarbon accumulation. Overall, it can be concluded that physical simulation, numerical simulation, and artificial intelligence represent the trends of research on carbonate sedimentology, reservoir geology and experimental technology.

Key words: experimental technology, research frontier, trend, reservoir geology, sedimentology, dolomite, microbialite, carbonate rock

引用格式:周进高,徐哲航,黄世伟,等. 碳酸盐岩沉积储层研究前沿与未来发展方向[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(4): 929–953. DOI: 10. 11743/ogg20240404.

ZHOU Jingao, XU Zhehang, HUAN Shiwei, et al. Frontiers and trends in the research on carbonate sedimentology and reservoir geology[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(4): 929–953. DOI: 10. 11743/ogg20240404.

据统计,全球约52%的油气探明储量和约60%的产量来自碳酸盐岩^[1],中国近20年发现的普光、安岳、靖西和富满大气(油)田也来自碳酸盐岩^[2-6];从剩余储量看,中国碳酸盐岩天然气储量在全部天然气储量中的占比从“十五”末的24%提高到“十三五”末的35%,预计2030年达到40%^[7],可见碳酸盐岩蕴藏丰富油气资源,是当前和未来油气勘探开发的重要领域。前人对碳酸盐岩沉积储层开展了大量研究。早在20世纪50年代,以Ginsburg和Buthurst为代表的先驱们率先开启了碳酸盐岩殿堂之门,点燃了全球碳酸盐岩沉积学研究的兴趣,促进了碳酸盐岩沉积环境模型的建立。60年代,Folk(1962)^[8]和Dunham(1962)^[9]发表了碳酸盐岩分类的论文,从而奠定了碳酸盐岩岩石学的理论基础,推动了成岩作用研究的迅速发展。70年代至20世纪末是碳酸盐岩研究的黄金时期,Choquette和Prayd(1970)^[10]提出了基于孔隙和岩石组构之间关系的碳酸盐岩孔隙分类方案,Lucia(1995)提出基于成因的孔隙分类方案^[11];Read(1985)^[12]、Wilson(1975)^[13]及Tucker(1990)^[14]等提出了碳酸盐台地类型划分方案及其沉积模式,Sarg(2001)^[15]及Schlager(2005)^[16]等人开创性地将层序地层学应用于碳酸盐岩,Lucia(1999)^[17]建立了储层表征方法,Morre(2001)^[18]等将层序地层与成岩作用、成岩环境结合起来,推动储层成因研究,

建立了孔隙分布预测模型。进入21世纪,碳酸盐工厂、碳酸盐沉积微相分析、储层表征及储层建模研究方兴未艾,储层实验技术突飞猛进,但随着能源勘探向下古生界、前寒武系古老碳酸盐岩和深层-超深层领域发展,碳酸盐岩沉积储层相关理论和技术仍面临诸多问题与挑战,如微生物在碳酸盐生产和成岩中的作用尚不清楚,精细岩相古地理恢复难度大定量研究白云石化对成储影响的方法缺乏,超深层储层形成过程与保持机制不清,碳酸盐岩非常规储层形成机制不明确,实验技术流程和测试精度有待改善和提高,碳酸盐矿物U-Pb定年、碳酸盐团簇同位素和Mg同位素实验数据应用还存在不确定性等。针对上述问题,文章通过文献调研,结合中国近20年研究进展,系统梳理了碳酸盐岩沉积学、储层地质学和储层实验技术3大领域的研究前沿与进展,指出可能的未来发展方向,为深化碳酸盐岩沉积储层认识,加快深层-超深层油气勘探生产提供理论和技术支持。

1 沉积学研究前沿与进展

在碳酸盐岩沉积学领域,碳酸盐岩工厂、微生物作用与微生物岩沉积环境、岩相古地理与沉积模式等研究前沿取得重要进展,具体如下。

1.1 碳酸盐岩工厂

碳酸盐岩工厂(carbonate factory)的概念早在20世纪70年代就在壳牌石油公司碳酸盐岩沉积学实验室内使用,1977年,James教授首次较系统标识了“潮下碳酸盐岩生产工厂”的位置及生产产物的搬运途径,他认为碳酸盐岩工厂是一套系统,包括碳酸盐沉积物的生产、沉积和早期改造,并提出了光养(photozoan)和异养(heterozoan)碳酸盐岩工厂。20世纪90年代以来,“碳酸盐岩工厂”这一概念得到重视和深化,研究从浅水拓展至深水,从温热带拓展至高纬度寒冷地带,Schlager确立了热带浅水碳酸盐岩工厂、灰泥丘工厂和温凉水碳酸盐岩工厂各自的识别特征^[19],指出碳酸盐岩可形成于凉爽、寒冷甚至极寒的海水环境^[20-21],后来又将3种工厂简化为T工厂、C工厂和M工厂。其中,热带生产工厂被改称为T工厂,代表着热带(tropical)和水体顶部(top-of-the-water-column);凉水生产工厂被改称为C工厂,代表着温凉水(cool water)和受控型沉淀过程(controlled precipitation);灰泥丘生产工厂被改称为M工厂,代表着灰泥丘(mud-mound)、微晶(micrite)和微生物(microbes)。最近,Reijmer系统论述了全球控制因素(如光照、温度、营养条件、盐度、泥质含量和碳酸盐岩饱和度)和区域性控制因素(如洋流、上升流、海洋-气候系统、大气系统、水动力条件、陆源碎屑沉积物和淡水输入)对碳酸盐沉积物生产的影响,指出碳酸盐岩生产工厂概念体系研究是“近30年来碳酸盐沉积学领域最重要的进展之一”^[22]。他修订并补充了Schlager的碳酸盐岩生产工厂分类,如增加了冷水珊瑚生产工厂(cold-water-Coral factory, CWC工厂)和浮游工厂(planktic factory, P工厂),同时总结了5种碳酸盐岩工厂特征(图1)。热带浅水工厂分布于南北纬30°内的热带和亚热带、温暖、营养贫乏、光照充足及富含氧气的海洋表层,碳酸盐沉淀很大程度上以生物控制和非生物为主,主要建造者为光自养绿藻、珊瑚、有孔虫和某些软体动物,温度是其界限的主要控制因素,与其他碳酸盐岩工厂相比,热带浅水工厂生产碳酸盐岩的区域更浅更窄,但平均生产率最高。冷水工厂是深水和高纬度地区碳酸盐岩的重要生产者,但在低纬度的温跃层中也可能出现,碳酸盐沉淀多为生物控制型,异养生物占优势,碳酸盐沉积物由砂粒大小的碳酸盐生物骨骼碎片组成,缺乏热带型珊瑚礁和鲕粒,碳酸盐灰泥很少。灰泥丘工厂主要产物是泥晶碳酸盐岩,通常与微生物诱导和非生物沉淀有关,灰泥丘是在富含营养、低氧水域沉积形成,其中微生物和腐烂的有机物起

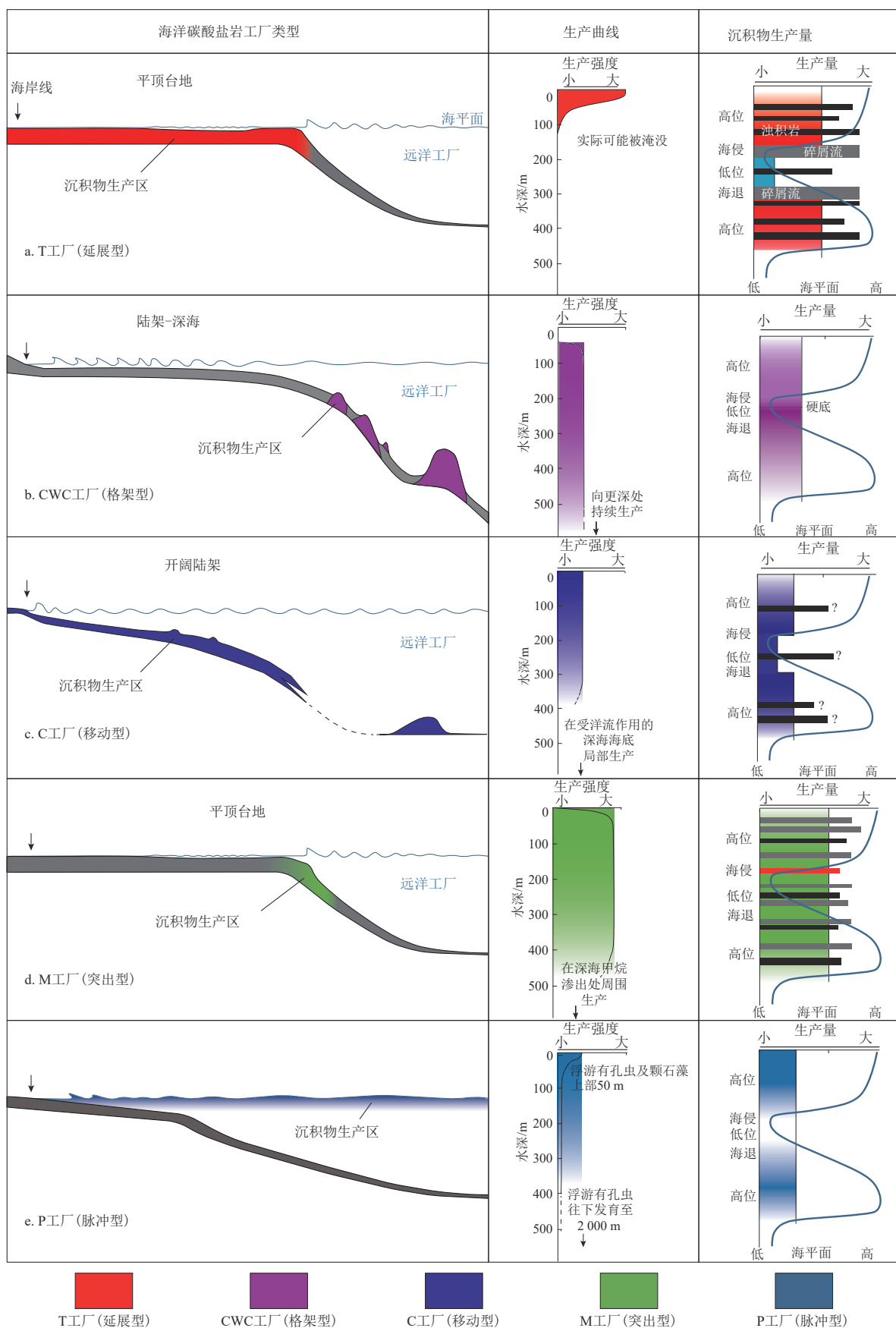
着核心作用。冷水珊瑚工厂分布于全球范围内,出现造礁珊瑚,并具有非常高的生物多样性,很大程度上依赖营养物的稳定输入,碳酸盐产量低,生产范围大,水深40~2 500 m。浮游碳酸盐岩工厂是通过浮游有孔虫、颗石藻和其他浮游碳酸盐生物在开阔海域产生碳酸盐沉积物的工厂,也广泛分布于全球范围内^[22]。此外,Li等(2019)提出鲕粒碳酸盐岩工厂,用来描述大规模鲕粒建造,认为表层海水温度、碳酸盐饱和度、干燥条件的极端温室气候显著促进鲕粒工厂的大规模碳酸盐生产^[23]。Wang等(2023)提出前寒武纪存在孔隙水中生成的自生碳酸盐岩工厂^[24]。

以上研究表明,碳酸盐岩工厂明确了碳酸盐的生产者、生产环境和产物,这对碳酸盐岩沉积环境恢复、烩源岩和储集岩发育位置的确定以及碳酸盐岩“源-汇”体系研究具有重要促进作用。

1.2 微生物作用与微生物岩沉积环境

1.2.1 微生物作用

研究揭示,微生物作用具有4项重要功能:①造岩固碳。微生物岩作为微生物作用的产物,广泛分布于寒武系-前寒武系,前人早已发现叠层石等微生物岩,但直到1914年,Walcott在元古宙硅质叠层石纹层中首次发现似蓝菌的微化石后,才意识到叠层石是碳酸钙在蓝细菌作用下沉淀形成^[25],此后研究发现,微生物生长、新陈代谢活动中黏附和沉淀矿物质或捕获矿物的颗粒形成叠层石、凝块石,并由此构成微生物席或微生物丘滩,Riding^[26]和Shapiro^[27]等据此对微生物岩进行了分类。②固碳造氧。微生物作用是推动地球大气氧化和演化的主要原因。Catling(2020)^[28]认为太古宙大气成分主要是N₂、CO₂、CH₄及一定量的H₂、He等气体,但几乎无O₂,Large(2021)^[29]认为进入元古宙后,在微生物光合作用的影响下,发生了古元古代大氧化事件(2 400~2 100 Ma)、新元古代大氧化事件(800~540 Ma)和中元古代间歇式增氧事件(约1 560,1 400,1 100 Ma)等重大地质事件,促使地球大气CO₂、CH₄和H₂等含量逐步降低,O₂开始积累,使元古宙大气和表层海洋演变成具有一定氧化的状态,也正是大气和表层海水具备一定的含氧量,促进了微生物的勃发和广泛的微生物作用。③微生物诱导沉积。近年,Chen等^[30]通过对鲕粒和球粒的研究,建立了微生物诱导下两类鲕粒和球粒的形成模式(图2),揭示了微生物还原和水动力条件共同控制鲕粒形成。Diaz^[31-33]则建立了一种现代鲕粒形成过程中微生物与早期海水胶结物共

图1 5种碳酸盐岩工厂特征^[22]Fig. 1 Characteristics of the five types of carbonate factories^[22]

生序列的模式,包括微生物将颗粒固着阶段、微生物诱导微晶胶结和环边胶结3个阶段,阐明了微生物在海底底质固化和海底胶结中具有十分重要作用。④微生物参与沉积。微生物参与沉积岩的形成,与沉积岩协同演化。谢树成认为^[34],微生物自出现就贯穿地球沉积演化过程,如元古宙与显生宙的过渡时期出现的从硅质、磷质到钙质的转换与原核微生物向真核微生物再向多细胞动物的演化以及海洋环境的pH和 E_h 等条件变化有关;显生宙一些重大突变期,碳酸盐岩工厂出现从骨架灰岩到钙质微生物岩的多次大转换,并且出现一些错时相和微生物成因沉积构造,也都与宏体生物出现危机后微生物生态系统的短暂发展有关;地质时期的条带状硅铁建造、灰岩、白云岩、磷块岩、硅质岩等沉积岩都与微生物作用密切相关,甚至一部分泥岩的形成也可能与微生物参与有关。

上述研究进展表明,微生物作用具有4项极其重要的功能:①通过光合作用固碳释放氧气,从而影响水圈、生物圈和大气圈的演化;②通过微生物钙化或微生物捕获黏结碎屑颗粒形成叠层石、凝块石和核形石等,沉积大量的微生物碳酸盐岩;③微生物诱导形成鲕粒、豆粒和球粒等碳酸盐组构,以及微生物诱导引起早期海底胶结作用;④微生物参与沉积,与沉积岩协同演化。上述进展对于我们重建地质历史时期碳循环、大气氧化和生物演化具有重要意义,也为碳封存提供了新思路。

1.2.2 微生物岩沉积环境

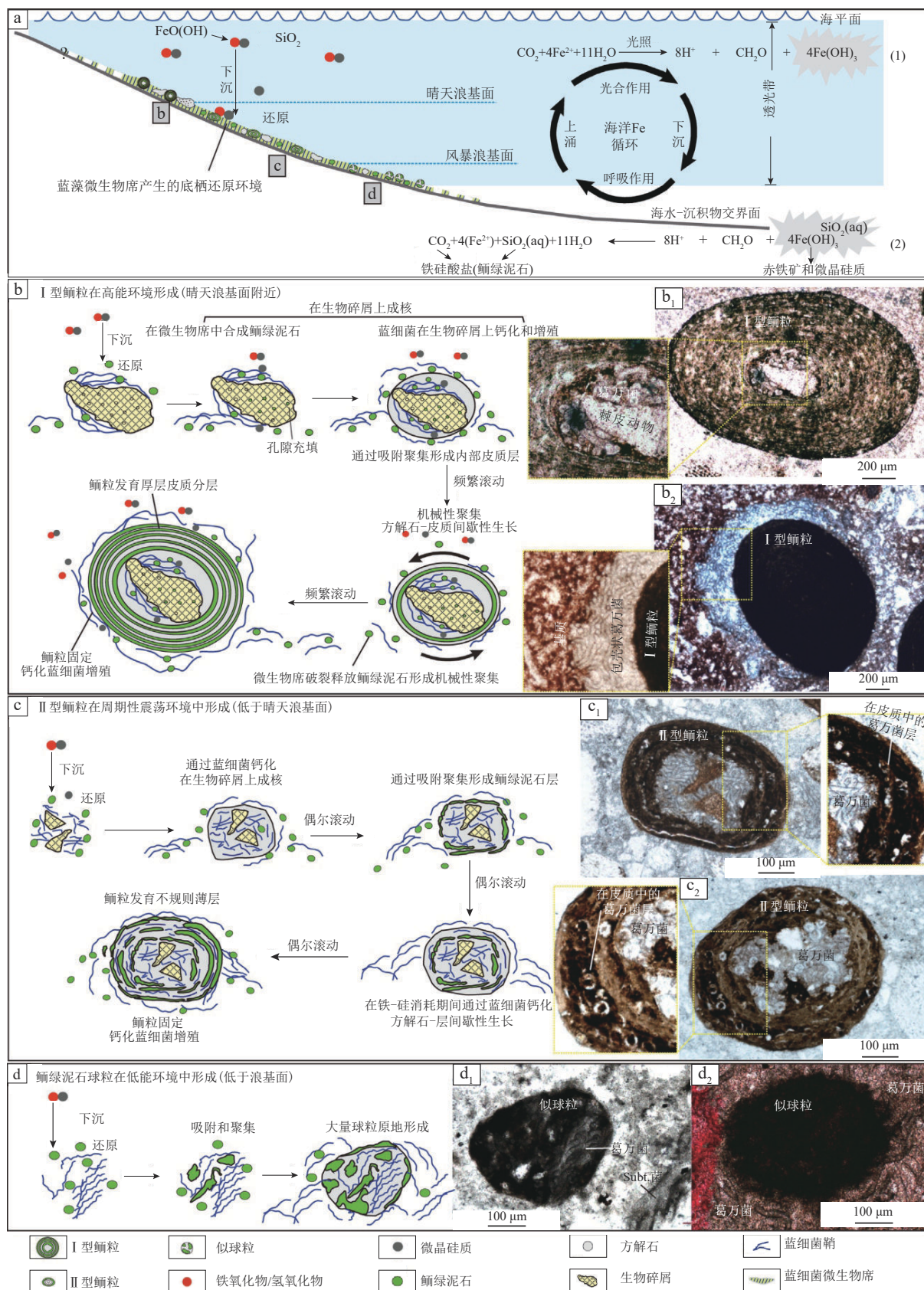
微生物岩一词是Burne和Moore在1987年提出来的^[35],是指由底栖微生物群落的生长和生理活动,引起沉积质点粘结和圈捕、表面矿物沉淀、生物矿化作用而产生的生物沉积岩,包括叠层石、核形石、树枝石和凝块石,以及某些鲕粒、团粒、球粒和泥晶,其物质成分可由碳酸盐岩、磷块岩、铁岩、锰岩和有机质岩组成,也可由硫化物岩、硫酸盐岩、黏土岩和各种碎屑岩组成。地质历史时期的微生物岩既可以单独存在,也常与蒸发岩和火山岩共生。随着鄂尔多斯盆地靖边气田和四川盆地安岳气田的发现,对微生物岩和蒸发岩体系的研究也不断深入,在微生物岩和蒸发岩沉积环境及沉积模式研究方面取得系列进展。①微生物岩分类。Riding(2000)^[26]和Shapiro(2000)^[27]将微生物岩分为叠层石、凝块石、树枝石、均一石及与微生物黏结颗粒岩等类型,胡安平^[36]提出基于构造尺度和形态特征相结合的微生物碳酸盐岩分类方案(表1)和命名原则,即构造尺度+形态特征+叠层石、凝块石、树枝石、核形

石等+灰岩或云岩。最近,吴亚生(2023)^[37]又提出微生物岩石(microbiolith)概念,指由微生物作用形成的岩石,并根据矿物组成,把微生物岩石分为微生物碳酸盐岩、微生物铁质岩、微生物锰质岩和微生物黏土岩;它们分别由微生物形成的碳酸盐矿物、铁矿物、锰矿物和黏土矿物组成。根据其成因和组构,可以把微生物碳酸盐岩分为微生物岩、微生物礁岩和微生物屑岩。②微生物岩沉积模式。周进高等(2017)^[38]、罗垚等(2022)^[39]建立了四川盆地灯影组微生物岩镶边台地沉积模式,认为灯影组主要发育叠层石白云岩、凝块石白云岩、葡萄花边白云岩等,沿德阳-安岳裂陷两侧发育台缘带,台缘和台内微生物丘滩具有良好储集性能;胡明毅等(2019)^[40]、郑剑锋等(2020)^[41]认为塔里木盆地肖尔布拉克组主要发育层纹石、凝块石、泡沫绵层石、叠层石和核形石5种微生物白云岩,识别出椭球形构造、水平层理、平行层理、双向交错层理、叠层石构造和帐篷构造6种主要的沉积构造,建立了微生物岩缓坡台地模式,并指出沿温宿古隆起向盆地依次发育内缓坡、中缓坡和外缓坡,其中中缓坡是中高能微生物丘和藻砂屑滩的有利发育区。此外,吴亚生等(2018)^[42]对重庆老龙洞剖面二叠系-三叠系界线微生物岩成因进行了研究,揭示微生物岩斑点状、树枝状、网状结构的亮晶充填体与漂浮蓝细菌有关,即表层水漂浮生活的微囊菌沉入海底掩埋后腐烂留下的孔洞被后期成岩矿物充填形成。至于蒸发岩体系,胡安平^[36]等(2022)^[43]、魏柳斌等(2023)^[44]认为多级隆起障壁、干旱气候和海平面升降3要素耦合是蒸发岩体系发育的关键,总结了蒸发成盐(潮坪环境)和浓缩成盐(浓缩潟湖环境)两种蒸发岩成盐模式并建立了碳酸盐岩与蒸发岩共生组合模型。

1.3 岩相古地理与沉积模式

1.3.1 构造古地理背景研究进展

构造古地理背景是岩相古地理恢复的基础,中国近20年来将构造古地理研究重点集中在古裂陷、古隆起和同沉积断裂3方面,古裂陷研究进展最大,其中以四川盆地德阳-安岳裂陷成因及其控相控储控藏的研究最多,同时带动了塔里木盆地和鄂尔多斯盆地裂陷的深化认识,目前在3大盆地识别出4期古裂陷,分别与哥伦比亚、罗迪尼亚、冈瓦纳、潘基亚4期超级大陆裂解相对应。四川盆地主要发育3期裂陷,如罗迪尼亚期的南华系裂陷、冈瓦纳期的德阳-安岳裂陷(震旦系-寒武系)^[45-48]、潘基亚期的梁平-开江海槽(二叠

图2 微生物介导的鲕绿泥石质鲕粒和似球粒形成过程示意模型^[30]Fig. 2 Schematic model showing the microbially mediated formation processes of chamosite ooids and peloids^[30]

a. 海洋环境下微生物诱导合成绿泥石生物化学模型,绿泥石是鲕粒暗色皮壳层的主要矿物成分;b. 浪基面附近低能环境下I型鲕粒形成模式;
c. 晴天浪基面之下低能环境II型鲕粒形成模式;d. 低能环境下绿泥石球粒形成模式

表1 构造尺度和形态特征相结合的微生物碳酸盐岩分类方案^[36]Table 1 Classification scheme for microbe-induced carbonate rocks based on a combination of structural scale and morphology^[36]

形态特征	构造尺度/cm			
	大型构造(≥100)	中型构造(50~100)	小型构造(1~50)	微型构造(≤1)
层状	层(席)状微生物碳酸盐岩	—	—	—
丘状	大型丘状微生物碳酸盐岩	中型丘状微生物碳酸盐岩	小型丘状微生物碳酸盐岩	—
	大型灰泥丘	中型灰泥丘	小型灰泥丘	—
波状	大型波状叠层石碳酸盐岩	中型波状叠层石碳酸盐岩	小型波状叠层石碳酸盐岩	—
柱状	大型柱状叠层石碳酸盐岩	中型柱状叠层石碳酸盐岩	小型柱状叠层石碳酸盐岩	—
穹窿状	大型穹窿状叠层石碳酸盐岩	中型穹窿状叠层石碳酸盐岩	小型穹窿状叠层石碳酸盐岩	—
锥状	大型锥状叠层石碳酸盐岩	中型锥状叠层石碳酸盐岩	小型锥状叠层石碳酸盐岩	—
泡沫状	—	—	—	泡沫状凝块石碳酸盐岩
团块状	大型团块状凝块石碳酸盐岩	中型团块状凝块石碳酸盐岩	小型团块状凝块石碳酸盐岩	—
球粒状	—	—	核形石(鲕粒)碳酸盐岩	
树枝状	—	—	小型树枝石碳酸盐岩	微型树枝石碳酸盐岩
均一状	均一石碳酸盐岩	—	—	—
层纹状	层纹石碳酸盐岩	—	—	—

注:“—”没有发育。

系)^[49-50]。鄂尔多斯盆地主要发育哥伦比亚期裂陷,如长城系的贺兰、定边、晋陕裂陷等^[51-53],盆地南缘和东北部还可能存在冈瓦纳期裂陷。塔里木盆地主要发育罗迪尼亚期裂陷,如南华纪的库满裂陷、塔西南裂陷等^[52]。除了古裂陷,对3大盆地古隆起研究也取得积极进展,如四川盆地震旦系的川中古隆起、古生代的乐山-龙女寺古隆起等^[54-55],塔里木盆地古生代的温宿古隆、轮南古隆以及塔西南古隆等^[56],鄂尔多斯盆地的中央古隆、横山低隆、米脂低隆以及吕梁低隆等^[57],这些古隆起与裂陷共同构成了隆坳相间的构造古地理背景,控制了中国海相碳酸盐岩沉积和源储分布。随着三维地震的广泛应用,对准同生断裂的认识也有新进展,如认识到四川盆地蓬莱地区震旦世同生断裂控制了德阳-安岳裂陷的东部边界,并控制了多级台缘丘滩体的发育;鄂尔多斯盆地南缘和西缘近期也识别出系列分别向南和向西倾斜的加里东期断裂,尤其是识别出西缘克里摩里期和乌拉力克期断裂控制了台地与斜坡相带的分布。上述进展对深化岩相古地理展布研究意义重大。当然,限于地球物理资料品质,还有一些裂陷无法识别出来,对古隆起的认识尤其是演化过程认识不足,对同生断裂的识别及其控相控储研究还相对薄弱,有待未来深化。

1.3.2 盆地级岩相古地理研究进展

为满足能源勘探的需求,中国岩相古地理的研究主要围绕沉积盆地开展。2000年以来,在四川、塔里

木和鄂尔多斯等盆地及其周缘开展了多轮岩相古地理研究,围绕油气重点勘探层系编制了系列岩相古地理图,取得了重要进展,如在理论上提出了构造裂陷期发育镶边台地、构造拗陷期发育缓坡台地、构造回返期发育蒸发台地的构造沉积演化规律,阐明了障壁碳酸盐台地的类型、特征和演化趋势;在实践层面上揭示了四川盆地震旦世灯影期发育裂离的孤立台地、早寒武世通过填平补齐演化成统一的碳酸盐缓坡,中晚寒武世演化为统一的镶边台地构造沉积演化过程,而晚古生代则由栖霞期-茅口中期的碳酸盐缓坡、茅口晚期-飞仙关中期的镶边台地、飞仙关晚期-雷口坡期的蒸发台地演化过程,并揭示出鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组具有多级隆坳构造背景,控制了多条台内丘滩带的发育。上述岩相古地理进展支撑了3大盆地海相碳酸盐岩区带评价和目标优选,如四川盆地震旦系岩相古地理进展支撑了安岳气田的发现,推动了勘探由川中古隆起地区拓展至古隆起北斜坡,并在蓬莱地区获得新的勘探突破,同时也支撑了勘探继续向北至剑阁地区,向下探索万米深度域,未来勘探值得期待。而鄂尔多斯盆地则支撑盐下勘探在马家沟组四段取得新发现,有望开启鄂尔多斯盆地海相含油气系统研究新征程。

1.3.3 沉积模式研究进展

台地沉积模式研究始于20世纪60年代,至今仍在不断完善。碳酸盐岩沉积相模式经历了二维到三维的发展过程,二维模式如陆表海模式^[58]、镶边台地模

式^[12, 14]、威尔逊的理想相模式^[13]、碳酸盐缓坡模式^[59]及孤立台地模式已为业界广泛应用^[14], Bosence^[60]提出了8种三维形态沉积模式, 包括断块型(fault-block)、盐丘穿刺型(salt-diapir)、下沉(被动)陆缘型(subsiding or passive margin)、孤立台地型(offshore bank or unattached platform)、火山底座型(volcanic pedestal platform)、前陆边缘型(foresland margin)、逆冲断块顶部型(thrust-top)和三角洲沉积顶部型(delta-top)。最近, Eberli 教授通过对巴哈马和意大利的碳酸盐台地研究, 也建立了新的台地模式^[61-62]。Aurell 和 Bádenas 对西班牙东北部伊比利亚盆地及野外露头进行广泛的相分析, 重建了中侏罗世的碳酸盐台地相模式^[63]。Petrovic 等建立了台地裂解与淹没的概念模型^[64], 他认为在厚盐层底辟作用和向海流动背景下, 加积台地裂解成不同块体并随着盐层流动而向海迁移, 由于不同块体迁移速度不同, 裂解的台地逐渐演化为孤立台地, 也因各块体的加积负载和沉降速率不同, 沉积快的块

体被淹没。而 Betzler 等则刻画了印度洋现代淹没台地构型^[65], 上述新进展将对碳酸盐岩沉积学研究产生重要影响。

中国在个性化沉积模式研究方面有新突破, 相继建立了“多台缘”镶边台地和“双滩”缓坡沉积模式^[38, 66-68]。图3a是多台缘镶边台地沉积模式, 该模式包含3类台缘和2种台盆, 3类台缘即大陆边缘台缘带、裂陷边缘台缘带和坳陷边缘台缘带, 2种台盆即裂陷台盆和坳陷台盆。台缘带构成了规模储层发育的物质基础, 经准同生溶蚀和晚期岩溶作用改造以及白云石化作用形成优质储层。2种台盆是烃源岩沉积的有利环境, 如四川盆地震旦系-寒武系德阳-安岳裂陷型台盆发育了灯三期和早寒武世优质烃源岩, 梁平-开江裂陷台盆发育长兴期烃源岩。该模式的建立揭示中国小克拉通碳酸盐台地内部存在多种成藏组合, 为台内油气勘探提供了理论依据。

图3b是“双滩”缓坡沉积模式, 该模式是对前人缓

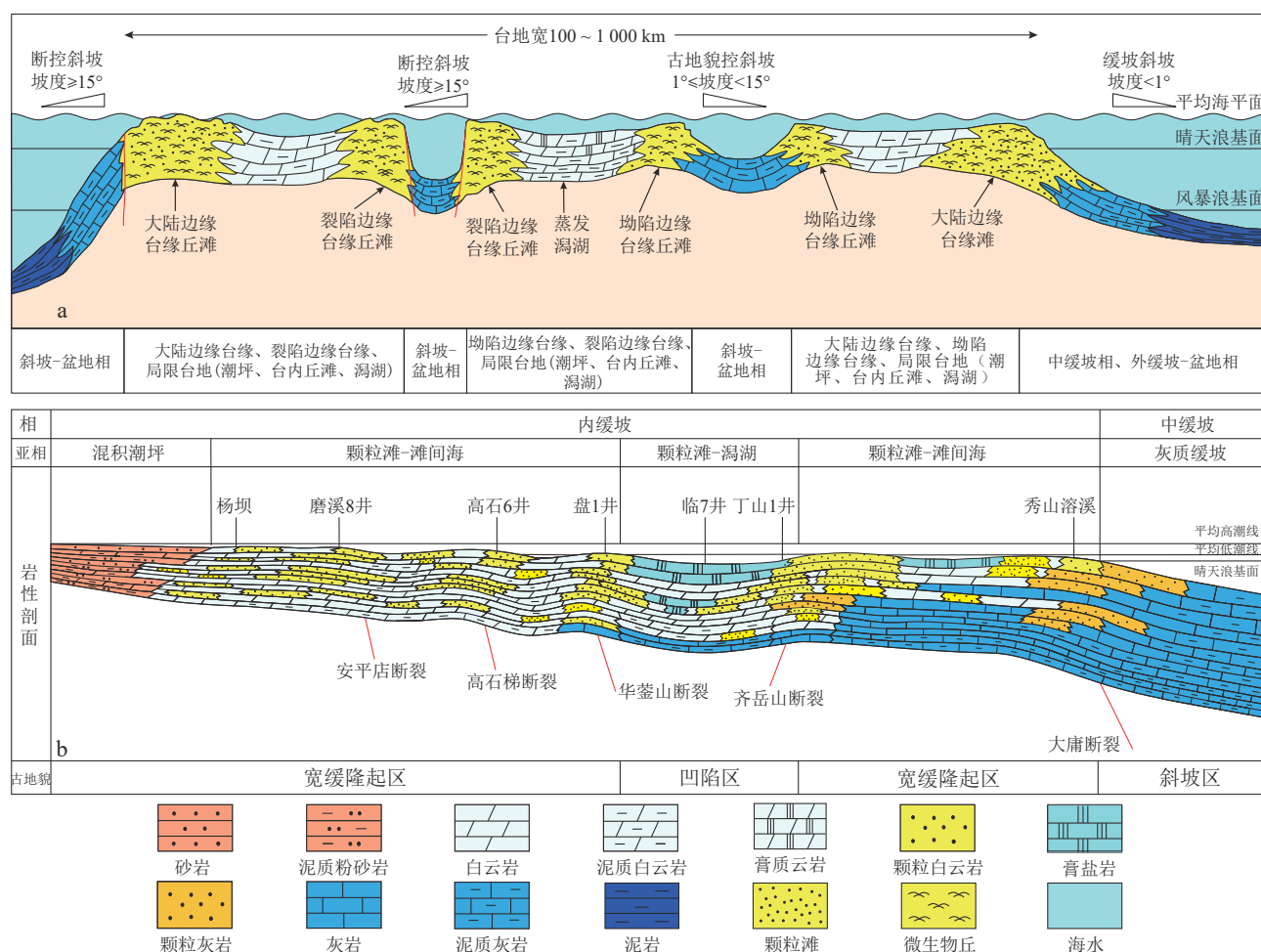


图3 “多台缘”镶边台地与“双滩”缓坡个性化沉积模式

Fig. 3 Individualized sedimentary models of rimmed platform with multiple margins and ramp with dual shoals

a. 四川盆地震旦系灯影组“多台缘”镶边台地; b. 四川盆地寒武系龙王庙组“双滩”缓坡

坡模式的改进,有2个特点:①在内缓坡发育两条规模的滩带,且滩带分布范围极广,如塔里木盆地肖尔布拉克组内缓坡颗粒滩沿塔西南隆起的北部缓坡和柯坪-温宿隆起的东南缓坡大面积分布,又如四川盆地龙王庙组内缓坡内外两条滩带,内滩带围绕川西古隆起大面积分布,白云石化和岩溶改造作用较强,成为良好储层^[69],外滩带沿巫溪-石柱-南川低隆带展布,白云石化变弱,储层质量变差。②在双滩之间发育台盆(台洼),如塔里木盆地肖尔布拉克期介于3个古隆之间的满加尔台盆,四川盆地龙王庙期的两滩带间的宣汉-重庆台洼(为咸化潟湖环境),它们是潜在的烃源岩发育区,与外缓坡烃源岩一起构成供烃系统,并与滩带形成有利成藏组合。目前,该类型成藏组合在四川盆地龙王庙组内缓坡滩带已发现安岳特大型气田,这对指导具有相似构造-古地理背景的塔里木肖尔布拉克组勘探具有重要借鉴意义。

2 储层研究前沿与进展

储层研究包括机理性和应用性研究,机理性研究在白云石成因和储层控制因素等前沿领域取得突破性进展,而应用性研究在微生物岩储层、断控储层及碳酸盐岩非常规储层的形成与分布方面进展突出。

2.1 机理性研究进展

2.1.1 白云石形成机理

白云岩是油气勘探的重要目标^[70-71],但常遇著名的“白云石问题”。该问题包括两个内涵:①实验室低温条件下(<60℃)无法合成有序白云石^[71-72],即在没有催化剂的常温常压条件下,白云石无法跨越动力学和地球化学屏障直接沉淀;②古老地层发育大规模白云岩,但现代地层中白云岩含量较少^[74-75]。近期研究在微生物诱导白云石化、溶蚀-再沉淀和高溶解 SiO_2 浓度促进白云石化等前沿领域取得突破性进展

1) 微生物诱导白云石化机制。微生物诱导白云石化由 Váscnelos 提出,他通过硫酸盐还原菌培养实验从溶液中直接沉淀出原生无序白云石,从而建立了微生物成因白云石形成模式的研究基础。随后大量类似的培养实验被广泛尝试^[76-78]。目前普遍认为硫酸盐还原菌、产甲烷菌和嗜盐好氧菌均可在常温常压条件下介导原白云石沉淀^[79-80],但这些原白云石并非有序白云石^[81]。中国学者在微生物参与形成白云石理论也取得系列新认识,如赵东方等(2022)认为矿物形貌

不能作为单独证据来判识白云石成因^[82];许杨阳等(2018)指出微生物(有机)成因白云石为原白云石,而非有序白云石,“从无序向有序的转化”仍然是缺失的^[81];刘邓等^[83](2024)利用一株异化铁还原菌获得了无序“原铁白云石”,并通过模拟实验证实其可以在水热条件下转化为有序铁白云石;最近又提出微生物诱导原白云石的沉淀结晶路径和机理,认为微生物成因原白云石的成核过程呈现两阶段式特征:首先是从离子态到非晶富镁碳酸钙(ACMC),然后再到原白云石的形成^[84]。需要注意的是,微生物参与形成(包括诱导、影响、催化等)^[85]的白云岩与微生物白云岩储层是两个概念。前者反映白云石的成因;后者指主要矿物成分为白云石的微生物岩,关于微生物岩储层研究进展见下文。

2) 溶解-再沉淀驱动的白云石化机制。Kim 等提出了溶解-再沉淀驱动的白云石化机制,揭示了白云石从无序向有序转化的过程^[86],具体包含以下3个方面:①运用原子模拟指出白云石生长受抑制是导致低温无法合成有序白云石的主要原因;②基于“密度泛函原理(density functional theory)模型”结合“蒙特卡洛动力学模拟(kinetic Monte Carlo)”,表明流体频繁的过饱和-不饱和周期性的振荡会大幅加速白云石生长;③通过透射电镜下合成实验观察,证明多次循环性的溶解-再沉淀可大幅度提升白云石形成速率。Kim 等的研究启示人们关注溶蚀作用对于白云石化的驱动,可以重新评估白云石化的水文模式并在地质层系中进一步检验(图4)。此外,Hashim 等设计实验探究了钠和钾元素浓度对白云石形成速率、晶体形态特征的影响^[87]。

3) 高溶解二氧化硅驱动白云石化机制。Fang 等(2023)通过对美国犹他大盐湖白云岩研究指出,高溶解二氧化硅浓度可能是犹他大盐湖白云石沉淀的驱动因素,同时也是富Mg黏土形成的主要控制因素,并推测这有利于显生宙的全球风化和溶解硅输入到古海洋,于是白云石丰度的变化可能与全球 CO_2 水平有关^[88]。除了模拟与实验验证,白云岩实例研究也在持续推进,如Li等(2023)分析了新生代岛屿型白云岩成因^[89],该类型研究对于认识云化流体是正常海水的水文学驱动机制具有探索意义^[90]。Perri^[91]和You等^[92]分别报道了三叠系和寒武系叠层石中的微生物白云石,认为具荧光显示的条带和基团、纳米-亚微米级球粒和化石微生物、正碳负氧的同位素组成等特征,可作为微生物成因白云石的综合识别标志。此外,湖相白云岩也是近年来的研究热点。Guo等综述了4类碱度盐

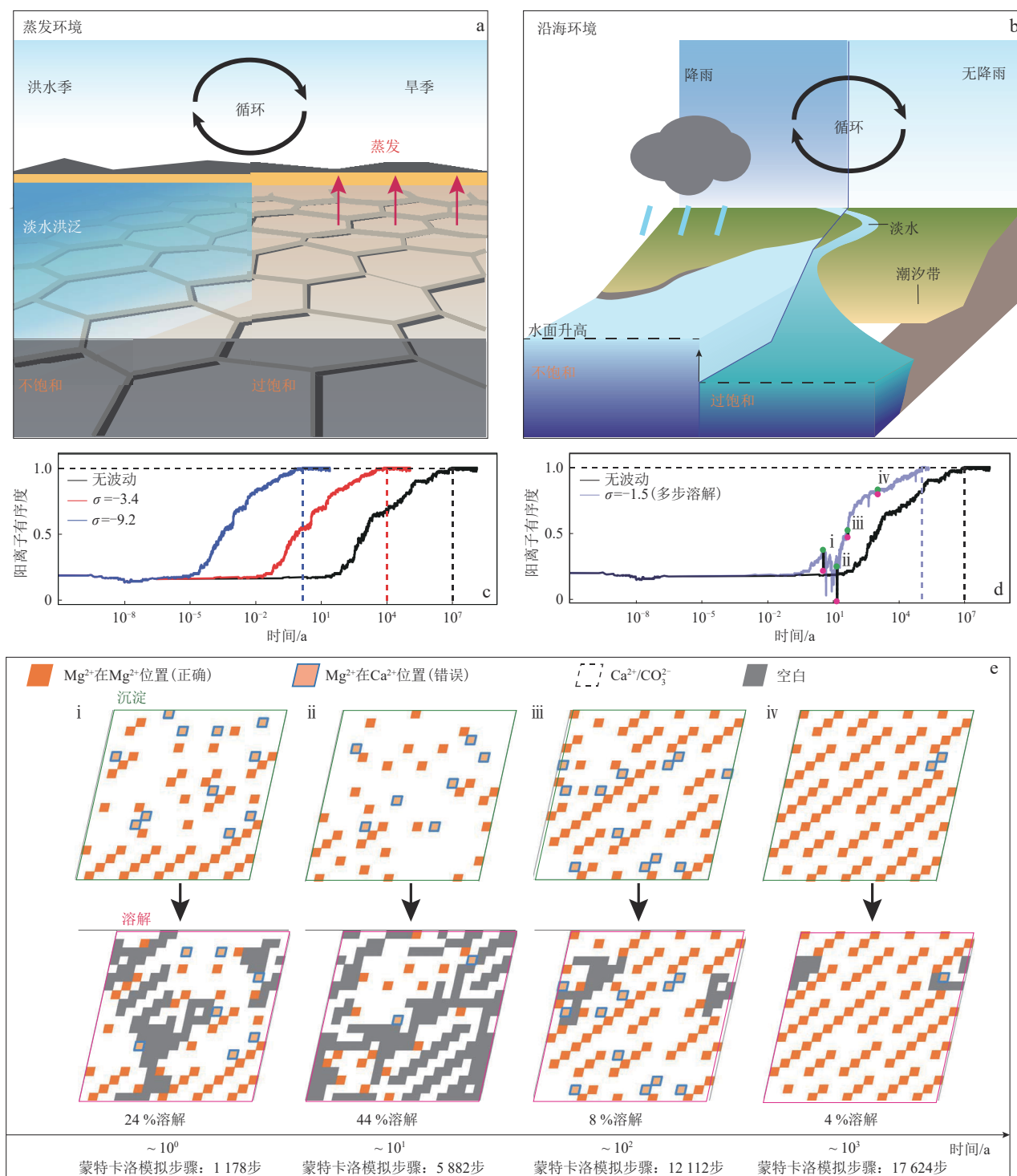


图4 过饱和度波动在加速白云石有序化溶解—再沉淀过程中的作用^[86]

Fig. 4 Role of supersaturation fluctuations in accelerating the dissolution-precipitation process in facilitating ordered dolomite growth^[86]

a. 蒸发环境盐度振荡条件下可观察到现代白云石; b. 沿海环境盐度振荡条件下可观察到现代白云石; c. 步调调节过饱和度波动模拟盐度波动;

d. 时间调节模拟盐度波动; e. $\sigma = -1.5$ 时间调节过饱和度波动的表面结构快照, 对应的时间见 d 图中标注

(σ 为模型里饱和度变化的调控参数。)

度的古白云石湖, 它们在岩相、矿物学和同位素组成等方面表现出不同的特征^[93-95]; Raudsepp 等讨论了澳大利亚南部库伦湖中现代超高镁方解石和菱镁矿的非典型结晶模式^[96]。

2.1.2 储层形成主控因素

碳酸盐岩的孔隙演化是石油储层科学中最复杂、最难预测的卡点之一^[97], 储层主控因素分析是破解该

难题的重要方法,长期持续的研究使得认识不断深入,近年,Ehrenberg认为碳酸盐岩孔隙度随深度降低是由于上覆压力、温度、时间或是一些组合的影响,且这4个因素相互关联,并总结了11个储层主控因素,分别是沉积结构、准生过程、硬石膏胶结作用、白云石化、超压、石油充注、黏土和缝合线、埋藏溶蚀、喀斯特、裂缝及层序地层。Immenhauser总结了碳酸盐岩浅、中、深埋藏环境的深度、温度、流体类型、水-岩关系、成岩组构及同位素地化模式等典型特征^[98](图5)。金之钧^[99]认为优质碳酸盐岩储层的形成主要受原始沉积环境和后期成岩改造(包括成岩作用、构造作用和流体作用)两大因素所控制。沉积环境控制着有利的原始沉积相带分布及早期孔隙发育,多期建设性成岩作用(如白云化、岩溶作用等)、构造作用、流体作用和多种类型流体-岩石-构造相互作用的后期成岩改造是储层形成和保存的重要机制。赵文智、沈安江、周进高等^[100-109]提出深层储层仍然具有相控性,丘滩和蒸发潮坪相带、白云石化、岩溶作用和早期烃类充注是储层形成与保持的关键因素,认为热液白云石化对成储贡献有限,而其对深层储层的破坏性改造大于建设,并提出深埋条件下白云岩储层的储集空间演化的主要途径^[110]。近期的研究逐渐向超深层转换,赵文智等(2023)^[111]认为高能相带叠加建设性成岩作用是超深层海相碳酸盐岩储层规模成储的关键,并提出超深层发育4类规模储集体,即同沉积断层控制的台缘带礁(丘)滩体、环同沉

积隆起分布的颗粒滩体、环台凹/盐凹分布的颗粒滩体以及走滑断裂相关的断溶体。此外,针对不同的地质实例,Koeshidayatullah等总结了断裂控制的热液白云石化不同位置的岩石学、地球化学特征与云化模式^[112-114];Gasparrini等联用U-Pb定年和团簇同位素测试揭示了阿联酋阿拉伯组白云石发生重结晶的温度约45℃,时间在45 Ma,油气充注阻止了该过程的进一步发生^[115];Araújo(2022)等学者从不同角度对巴西盐下储层进行了精细描述^[116-119]。

2.2 应用性研究进展

2.2.1 微生物岩储层

安岳特大型气田发现后,对微生物岩储层的研究热情持续上升,主要进展包括:①建立多个微生物岩储层成储模式。如姚根顺等^[120]通过灯影组二段(灯二段)“葡萄花边”白云岩储层研究,建立了葡萄花边”状白云岩储层的准同生岩溶成储机制,认为灯二段沉积时期海平面经历了多期次的升降运动,当海平面下降时,刚固结不久的地层暴露受到溶蚀并形成规模不等的岩溶缝洞体以及岩溶角砾,当海平面再次上升时,在缝洞体中以及角砾周缘开始形成多期次的纤状白云石胶结物,之后经埋藏充填残留部分缝洞,成为缝洞型储层。周进高等、徐哲航等^[121-123]对川中古隆起灯影组微生物白云岩储层开展研究,建立了微生物丘滩叠加两

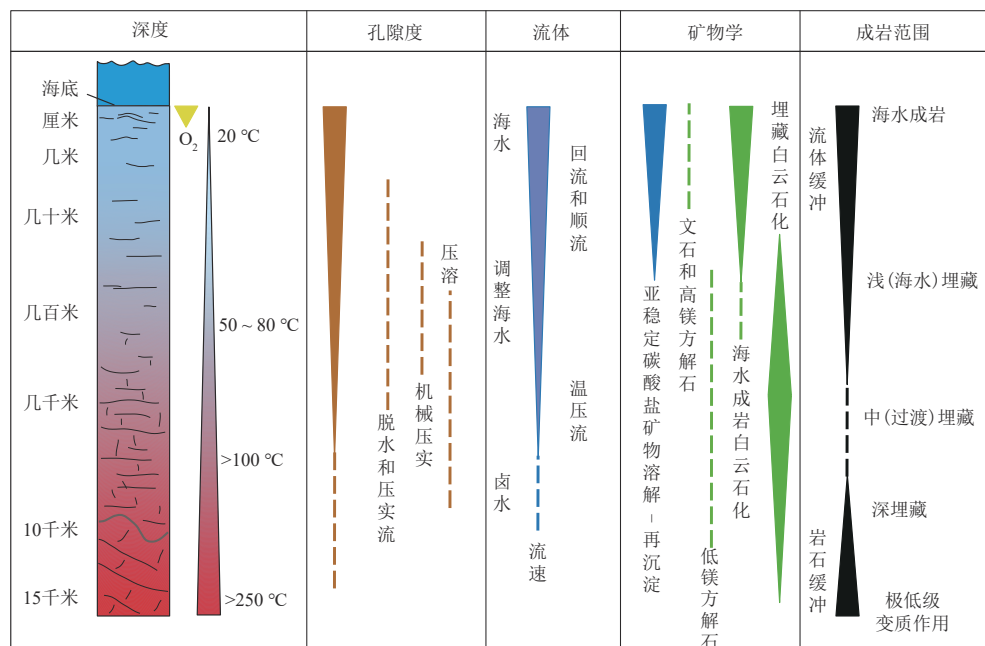


图5 埋藏域类型与典型特征^[98]

Fig. 5 Types and typical characteristics at diverse burial realms^[98]

期岩溶成储模式,认为微生物丘滩是成储基础,准同生岩溶和三级层序界面暴露岩溶是储集空间形成关键,而胶结及沥青充填降低了储层的物性。杨雨、杨威等^[124-125]则建立了微生物白云岩储层岩溶成储模式,认为灯四段微生物白云岩储层的形成主要受表生岩溶控制,与桐湾运动引起的台地暴露有关。郑剑锋等(2020)^[126]通过柯坪露头区寒武系肖尔布拉克组储集层地质建模,揭示肖尔布拉克组主要发育层纹石、凝块石、泡沫绵层石、叠层石、核形石、藻砂屑/残余颗粒结构的晶粒白云岩和泥晶颗粒/颗粒泥晶/泥质白云岩,识别出微生物格架溶孔、溶蚀孔洞、粒间/内溶孔和晶间溶孔5种主要储集空间类型,认为孔隙发育具有明显的岩相选择性,泡沫绵层石白云岩平均孔隙度最高,凝块石、核形石和藻砂屑白云岩次之,储集层主要受沉积相、微生物类型、高频层序界面和早期白云石化作用共同控制。王振宇等(2023)^[127]认为塔里木盆地肖尔布拉克组发育凝块石白云岩储层,并建立了凝块石白云岩孔隙演化发育模式:即同生-准同生期大气淡水溶蚀作用是形成孔隙的关键,埋藏期溶蚀作用使得孔隙进一步改善,最终形成以凝块内溶孔(占比72%)为主的孔隙类型。②揭示了微生物在成储过程中的作用。如周进高等^[121]认为底栖微生物生长可以形成格架孔,而微生物捕获灰泥或颗粒形成凝块石,由凝块石堆积形成格架孔。沈安江等^[128]指出微生物早期降解酸抑制了胶结物的沉淀从而保护原生孔隙,而在埋藏期因微生物热解作用再次释放有机酸,对先存孔隙进行扩溶增孔,同时也通过模拟实验揭示了不同类型微生物岩的成储效应有所差异,其储层质量从优到劣依次是凝块石微生物岩、叠层石微生物岩、黏结颗粒微生物岩和均一石微生物岩。

2.2.2 断控储层

断裂活动对碳酸盐岩储层的改造作用不仅仅体现在形成裂缝和破碎带等方面,而且还可以导致碳酸盐岩储层发生一系列物理和化学变化,由断裂作用或断裂叠加岩溶作用形成的储层称之为断控储层。吕修祥对塔里木盆地塔河油田的研究就发现了加里东中期岩溶多分布于早期断裂带附近,认为断裂对于该期岩溶至关重要^[129]。鲁新便等人针对顺北油田碳酸盐岩的开发实践首次提出了断溶体油气藏的概念^[130],即碳酸盐岩受构造作用形成的深大断裂破碎带,受多期断控岩溶或局部热液溶蚀作用形成大型洞穴、溶蚀孔洞和裂缝组成的储集体,在上覆泥灰岩、泥岩等盖层封堵以及侧向致密灰岩遮挡下,形成由不规则状的断控岩溶缝

洞体组成的断溶体圈闭,经油气充注成藏后形成一类特殊的断溶体油气藏。焦方正(2018)认为顺北油田主要储集空间为与走滑断裂相关的洞穴、构造高角度缝和沿缝溶蚀孔洞,洞穴(钻井放空)主要发育在断裂带附近,高角度缝以北东走向为主、与主断裂走向一致,说明洞穴和高角度缝发育与走滑断裂多期活动有直接关系^[131]。随着生产实践和认识的不断深化,哈拉哈塘油田碳酸盐岩油藏由风化壳岩溶、层间岩溶为主控的缝洞体油藏认识逐步转变为深大断裂控储、控藏、控富的断溶体油藏认识^[132]。近年来,断控储层已成为储层研究的热点之一,并在断裂成储机制、断控缝洞储层表征方面取得重要进展。王清华、陈红汉、冯建伟等在断裂成储机制方面,提出走滑断裂核带破裂和断脱空腔成储机制,并在核带模型基础上建立了栅状分布模式;在断控缝洞储层表征方面形成了断裂内部结构及缝洞连通表征方法,有利支撑了富满油田勘探开发^[133-138]。付晓飞等^[139]应用构造物理模拟实验,明确了顺北5号断层北段主体表现为多段式特征,发育平直型、压隆型和拉分型3种类型构造样式,主要活动时期为加里东中期Ⅲ幕与加里东晚期,提出“分期-异向”叠加变形控制了顺北5号断层北段走滑断层的变形过程和形成机制。断控储层研究也从塔里木盆地逐渐向四川盆地和鄂尔多斯盆地延伸,如何骁等、梁瀚等、邬光辉等^[133-138]对四川盆地川中古隆起和古隆起北斜坡走滑断裂及其成储作用进行了研究,付小东等(2023)^[140]认为川中古隆起及斜坡区走滑断裂以近EW向和NW-SEE向为主,加里东期-海西早期、海西晚期-印支期和燕山中期-喜马拉雅期是走滑断裂主要活动时期。走滑断裂沟通了多套源储组合,对盆地中西部海相多层系立体成藏控制明显,建立了走滑断裂4种差异化立体成藏模式。张威等(2023)^[141]对鄂尔多斯盆地伊陕斜坡北部大牛地区块三维地震数据的精细解释,厘定了研究区走滑断裂的构造特征及演化过程,认为大牛地区块发育4条不同走向的走滑断裂,即近NS-NNE向石板太断裂、NW向秃尾河断裂和小壕兔断裂、NEE向台格庙断裂,具有垂向分层、走向分段特征,走滑断裂的形成演化分为加里东期-海西期、印支期、燕山期及喜马拉雅期等4个阶段,形成背景和机制受周边板块相互作用影响,其中,石板太断裂北段与台格庙断裂构成的X型断裂体系与扬子板块与华北克拉通碰撞挤压有关,而石板太断裂南段与秃尾河断裂构成的X型断裂体系则与古太平洋板块向欧亚板块的俯冲挤压有关。目前,断控储层在Ⅰ级和Ⅱ级断裂成储及其储层表征方面形成了比较成熟的理论和技术方法,但在低

级序断裂的识别及其成储效应的研究方面仍然薄弱,有待深化。

2.2.3 碳酸盐岩非常规储层

碎屑岩非常规储层在业界已广为熟悉,研究和认识程度相对深入,但碳酸盐岩非常规储层是最近两年才发现的,研究程度不高,但勘探已证实具备工业价值,如四川盆地二叠系茅口组一段泥灰岩和三叠系雷口坡组三段泥灰岩,鄂尔多斯盆地的太原组致密灰岩等。以茅口组一段泥灰岩为例,传统上称之为“眼球眼皮灰岩”,眼球由富含生屑的粒泥灰岩组成,眼皮由富生屑富硅的泥质灰岩或灰质泥岩组成,以前笼统将其作为烃源岩处理,常作致密层或盖层看待,目前研究揭示,其实际是一套非常规碳酸盐岩储层,储集空间发育在“眼皮”,其矿物成分主要为滑石、海泡石,含少量白云石、方解石和黏土矿物,储集空间为微米、纳米级矿物粒间孔晶间孔^[142-149],另外,微裂缝也较发育。尽管碳酸盐岩非常规储层的研究才刚起步,对形成机制的认识和表征方法尚不完善,但相信在不久的将来会成为研究和勘探的热点之一。

3 实验技术前沿与应用进展

国内外研究均把定温、定年和定流体属性作为实验测试技术的研究前沿,近年在团簇同位素定温、碳酸盐矿物U-Pb定年、Mg同位素追踪流体来源等方面进展迅速。

3.1 碳酸盐团簇同位素测试技术

碳酸盐团簇同位素的测试流程和分析方法基本成熟,目前主要侧重于数据的校正和应用。国外以数据校正等偏机理的基础研究为主,例如Yanay等(2022)采用可调谐红外激光微分吸收光谱仪(TILDAS)系统来测量用于碳酸盐团簇同位素测温的4种CO₂同位素的丰度^[150],Perez-Beltran等(2023)通过模拟解释碳酸盐团簇同位素固态重排的原理^[151],Bajnai等(2020)提出碳酸盐双团簇同位素($\Delta_{47}+\Delta_{48}$)测温可以避免动力学分馏造成的偏差,实现古温度的有效重建^[152-153],Swart等(2021)利用实验室合成方解石成功建立了首个碳酸盐团簇同位素 Δ_{48} 的温度标定公式,展现出碳酸盐双团簇同位素测温的巨大应用潜力^[154]。此外,也有学者用碳酸盐团簇同位素结合其他分析手段与地化参数解释地质实例,如Dickson等(2023)用团簇同位素结合微区碳、氧同位素阐释英属马恩岛石炭系带状方解石胶结

物的沉淀过程^[155],Goldberg等(2021)^[156]通过对比碳酸盐团簇同位素和氧同位素恢复泥晶灰岩样品中不同组分的温度,发现早古生代碳酸盐全岩 $\delta^{18}\text{O}$ 数据受到成岩改造的影响较小,且与腕足壳和牙形刺氧同位素结果有较好的一致性,并以此为基础选取数据恢复了全球寒武纪-奥陶纪的高分辨率温度记录,对碳酸盐工厂-生命-气候环境协同演化进行探索。需要指出的是,碳酸盐团簇同位素在漫长的埋藏成岩过程中由于溶解和重结晶作用的改造,其最终记录的可能是成岩流体温度^[157],使得地质含义的解释具有不确定性。

国内在“地质温度计”的应用上取得可喜进展,如广泛应用于热史-埋藏史的重建^[110, 158-160],成岩流体的识别^[161-163],白云岩的形成与储层演化^[164-166]。对于深层-超深层古老碳酸盐岩地层,运用该技术的关键是区分团簇同位素的改造机制,即固态重排和流体-岩石相互作用。Lu等提出了基于方解石和白云石热动力学行为差异的固态重排识别方法^[167],将其应用于四川盆地震旦系灯影组白云岩各类白云石组构的碳酸盐团簇同位素研究,结果表明不同组构经历了差异的成岩改造过程^[168],另外通过定量表征不同组构的水/岩比程度,反映了它们成岩强度的差异,这为储层保存机理的研究提供了新的思路(图6)。尤其是综合运用碳酸盐双团簇同位素($\Delta_{47}+\Delta_{48}$)对现代白云岩研究中,很好示踪了微生物参与白云石形成过程所导致的同位素不平衡过程响应^[169]。因此结合碳酸盐团簇同位素动力学模型,有望阐明古老地层中白云岩形成机理。

3.2 碳酸盐矿物U-Pb定年技术

U-Pb同位素定年是一项十分成熟的技术,使用传统的同位素稀释法对碳酸盐矿物进行U-Pb定年,是通过²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb和²³⁸U/²⁰⁶Pb等时线与Tera-Wassenburg谐和线的下交点来计算碳酸盐矿物的结晶年龄。碳酸盐U-Pb溶液法同位素定年在中、新生代年轻的孔洞和洞穴充填物定年研究中已有报道,但由于U元素含量普遍偏低、缺乏合适的标样、难以钻取足够量的粉末样品(6~8个平行样品,每份200 mg)等问题,导致无法推广。2018年,中国石油天然气集团有限公司碳酸盐岩储层重点实验室将激光剥蚀(LA)与高分辨单接收电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)联用大幅提高U的检测精度,使U含量检测极限低至10 μg/L,同时开发了年龄值为(209.18±1.20) Ma的实验室工作标样,从而建立了适用于古老海相碳酸盐岩的U-Pb激光原位同位素测年技术^[170]。该技术主要流程如下:①先用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)对样

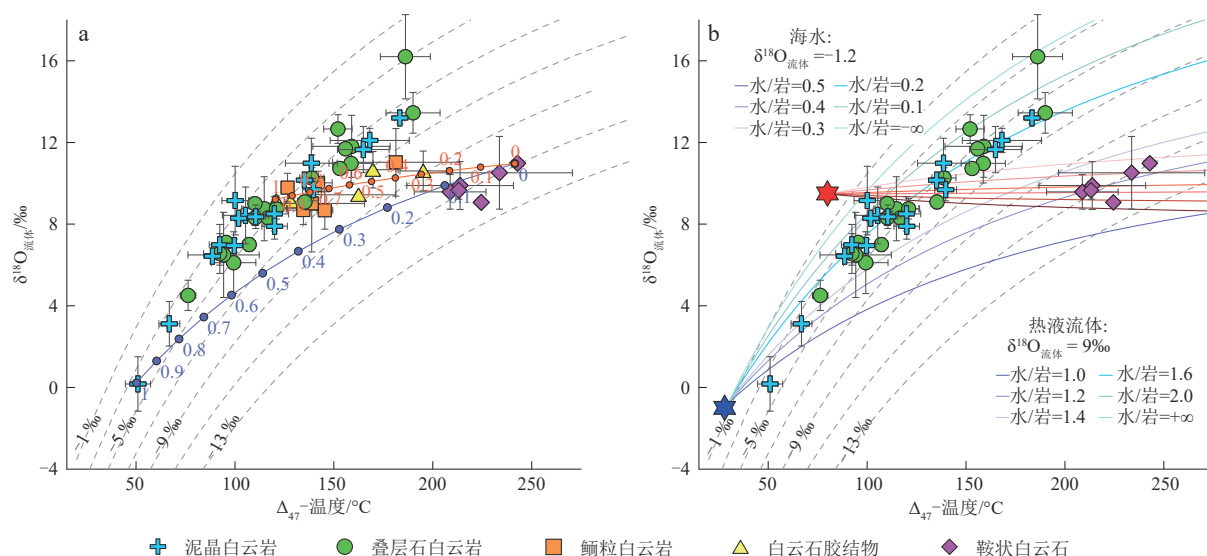


图6 四川盆地震旦系灯影组不同白云石组构碳酸盐团簇同位素换算温度(Δ_{47} -温度)及氧同位素($\delta^{18}\text{O}_{\text{流体}}$)与模拟结果比较^[167]

Fig. 6 Comparison of measured and simulation results of clumped isotope temperature Δ_{47} vs. $\delta^{18}\text{O}_{\text{fluid}}$ of different dolomite fabrics in the Sinian Dengying Formation, Sichuan Basin^[167]

a. 预测(蓝色线)和实测(图例中点) $\delta^{18}\text{O}_{\text{流体}}$ 和 Δ_{47} -温度交会图;b. 海水(蓝色线)与热液流体(橙色线)模型反映结果

品进行微量和稀土元素激光面扫成像分析,确定 ^{238}U , ^{206}Pb , ^{207}Pb 和 ^{208}Pb 的含量,帮助判断样品是否同期和适合激光原位 U-Pb 同位素定年。② 选择激光系统工作条件为输出能量 3 J/cm^2 ,剥蚀束斑直径视结构组分大小和 U 的含量选择 $100 \sim 300 \mu\text{m}$ (U 含量高,束斑直径可减小),剥蚀频率 10 Hz 。③ 装入样品靶后,气体连续冲洗样品池约 2 h ,除去样品池和气路中可能存在的普通 Pb。④ 采用单点剥蚀方式,单点分析时间为 3 min ,单点剥蚀之前对样品点预剥蚀 2 s 以消除表面 Pb 污染,信号较高的 ^{238}U 使用法拉第杯接收,信号较低的 ^{207}Pb , ^{206}Pb , ^{208}Pb , ^{232}Th , ^{204}Pb 和 ^{202}Hg 同位素用离子计数器接收,超低 ^{238}U 同位素含量的信号用 IC5 接收。⑤ 在联接激光之前必须用 Pb, Th 和 U 元素的混合测试液对质谱仪 Nu Plasma II 进行质量标定和杯结构、透镜参数进行优化。连接激光之后采用对 NIST612 以线扫描的方式调节仪器参数,使仪器灵敏度最高。⑥ 数据处理先使用 Paton 等的 Iolite 3.6 软件处理原始数据,以获得相应的同位素比值,后在 Ludwig 等的 Isoplot 3.0 软件上完成谐和图绘制及年龄计算。目前,该项技术通常与碳酸盐团簇同位素定温和 C, O, Sr 稳定同位素联合用于储层孔隙演化史、储层形成过程、油气藏充注期次恢复等研究,如沈安江等利用该技术恢复了四川盆地灯影组储层孔隙演化和四川盆地川中古隆起震旦系灯影组油气充注与油气藏演化^[159,171],识别出 3 个成藏期:①以距今 $(416.0 \pm 23.0) \text{ Ma}$ 为代表的志留纪末的石油聚集;②以距今 $(248.0 \pm 27.0) \text{ Ma}$ 和 $(246.3 \pm 1.5) \text{ Ma}$ 为代表

的二叠纪末—早三叠世的石油聚集;③以距今 $(115.0 \pm 69.0) \text{ Ma}$ 和 $(41.0 \pm 10.0) \text{ Ma}$ 为代表的燕山期—喜马拉雅期天然气聚集。周进高等应用于鄂尔多斯盆地马家沟组储层成储过程恢复^[172],认为马家沟组盐上风化壳岩溶型白云岩储集层依次经历准同生白云石化、压实、风化壳岩溶、充填与破裂等成岩作用,膏模孔形成于表生岩溶阶段,被白云石粉砂和方解石等矿物充填,孔隙度由 $10\% \sim 40\%$ 降低至 $3\% \sim 8\%$,而盐下丘滩型白云岩储集层经历准同生白云石化、压实、海底胶结、准同生溶蚀、渗透回流白云石化、充填和破裂等成岩作用,储集层原生孔隙度为 $10\% \sim 30\%$,经海水胶结作用后降至 $0 \sim 6\%$,准同生溶蚀作用使孔隙度恢复至 $5\% \sim 15\%$,之后由晶粒白云石和方解石充填,孔隙度最终降至 $2\% \sim 6\%$ 。乔占峰等应用于塔里木盆地白云岩形成过程及孔隙演化的恢复^[173-176]等。碳酸盐矿物 U-Pb 同位素定年技术的发展无疑为储层孔隙演化、储层形成过程和成藏演化恢复提供了利器,但由于碳酸盐矿物在成岩过程中的不稳定性,测试获得的年龄数据也存在地质含义的不确定性,因此,定年数据的应用一定要结合地质背景,不能唯数据论。

3.3 Mg 和 S 同位素技术

除了传统的 C, O 和 Sr 同位素外,近年来 S 和 Mg 同位素分析方法已从全样分析进入到微区定点定量分析^[177],为利用 Mg 同位素示踪碳酸盐岩沉积-成岩过程研究奠定实验基础。Galy 等(2002)和 Higgins 等的研

究建立了碳酸盐岩 Mg 同位素理论体系^[178-179],Huang 等(2015)以中元古代雾迷山组白云岩为研究对象^[180],建立了以模拟海水白云石化过程的扩散-对流-反应模型,Peng 等以中寒武世徐庄组白云质灰岩为研究对象^[181],建立了以模拟流动水体白云石化过程的对流-反应模型,使利用 Mg 同位素示踪白云石化过程成为可能。李茜和朱光有等将 Mg 同位素广泛应用于塔里木、四川盆地白云岩成因机制和流体迁移研究^[182-186]。

关于 S 同位素,一直以来有学者利用蒸发岩和重晶石中的 ^{34}S 含量来揭示海洋中 ^{34}S 的长期变化。这些变化是由于硫在海水、蒸发岩和无机矿物之间的流动引起的。随着时间的推移,碳酸盐岩中的 ^{13}C 和蒸发岩中的 ^{34}S 往往呈负相关,碳酸盐岩记录的 ^{13}C 含量越高,大气中的正氧含量也越高,由此导致了硫化物矿物的风化率增加,表现为更多的负 ^{34}S ^[187-188]。含 S 矿物(主要是黄铁矿、硫酸盐矿物和有机结合硫)的多硫同位素组成常被用来重建古海洋的化学条件,从而推断当时海洋的氧化还原状态^[189-190],例如,Sansjofre 等认为“雪球地球事件”后的大规模黄铁矿形成及海洋硫酸根浓度降低反映了当时大气和海洋的氧化环境^[191-192];在埃迪卡拉纪沉积的黄铁矿和硫酸盐矿物中,多硫同位素指标同样指示氧化还原状态发生显著变化,并影响生物的进化过程和衰亡^[193];黄铁矿中偏低的 $\delta^{33}\text{S}$ 值指示三叠纪末期的生物大灭绝事件可能与海洋的短暂缺氧事件有关^[194];Munnecke 近期也指出,硫和其他稳定同位素联合是重建古海洋环境的有效方法。

4 未来发展方向

4.1 沉积学

从目前研究趋势看,碳酸盐岩沉积学未来重点发展方向有以下3个。① 古海洋环境的恢复。未来可能在利用 C、O 和 Sr 传统稳定同位素的基础上,广泛利用 S、U、V 和 Mo 等传统和非传统同位素来定量恢复古海洋环境,包括海水深度、海平面升降、氧化还原程度、古生产力等,并将环境变化与极端地质事件结合起来,深化元古代大氧化事件、雪球事件、成冰期、隐生宙/显生宙界线(P/T)古生物勃发、奥陶纪末和二叠纪与三叠纪之交(P/T)古生物灭绝等重大地质事件的认识,为保护地球环境提供新思路。② 沉积相和沉积微相数值模拟及智能化识别。首先,对现代沉积、典型露头或钻井剖面形成包括岩石组合、生物组合、地化参数等特征的地质模型,识别各种沉积微相标准图版,利用数值模拟

再现沉积过程和沉积微相的迁移,深化礁滩沉积与演化规律认识;其次是建立地质、测井和地震微相识别标签库,研发沉积相智能识别技术。③ 构造岩相古地理的重建与岩相古地理图的自动化编制。未来研究的重点将仍然是对含油气盆地多期裂陷、多级隆起和同生断裂等复杂构造背景恢复及构造背景控相作用研究;其次是高分辨岩相古地理重建,利用沉积相识别技术逐步实现岩相古地理图的智能化编制。

4.2 储层地质学

随着能源勘探向深层、向复杂构造区拓展,储层研究将向以下3方面深化。① 向沉积+成岩+构造协同演化成储机制方向发展。如果说以前对成储机制的研究经历了以关注沉积或成岩单因素为主到沉积与成岩综合研究两个阶段的话,那么未来研究将强调沉积、成岩和构造3大因素协同演化成储。当然,不同盆地和不同层系关注的重点不一样,如四川盆地可能关注礁滩微相与多期云化多期岩溶的协同成储,塔里木盆地关注礁滩与岩溶及断裂协同成储机制,而鄂尔多斯盆地则关注潮坪和台内丘滩与多期岩溶的协同成储等等。② 向深层-超深层碳酸盐岩储层形成演化过程模拟及恢复方向发展。随着向万米深度域的钻探,超深层储层的表征、成储和保存机制研究将越来越重要,对高温压条件下储层物理和数值模拟技术、高温压条件下储层的渗流机制和评价技术的需求也越来越旺盛,这必将促进超深层储层研究的蓬勃发展。③ 向断裂控储机制与表征方向发展。断裂成储是近年储层研究的热点,研究领域逐渐从塔里木盆地扩展到四川盆地和鄂尔多斯盆地,研究也从关注断裂成储扩展到岩相+断裂破碎+岩溶+云化等多因素综合成储,未来将关注不同应力机制下的断裂成储模式研究,关注低序断裂的成储效应研究,关注断控储层的非均质性表征与断控储层预测技术研发。

4.3 实验技术

储层实验技术发展已经进入快车道,近十年的发展尤为迅速,未来可能向非传统、非常规和智能化发展。非传统方面:将研发诸如 U、Si、V、Mo、I 等非传统同位素和 Re-Os、Lu-Hf 定年测试技术方法及其应用,同时通过优化流程、改进仪器和升级 C、O、Sr 等传统同位素测试技术,进一步提升和完善定年、定温和定流体属性“三定技术”的测试精度和测试效率,在应用层面上将传统与非传统同位素结合应用于古沉积环境和成岩环境恢复、储层演化过程和成储过程恢复。非常规

方面,包括两个次级方向:①由聚焦常规储层向非常规储层延伸,如发展以微米纳米级孔隙为主体的致密灰岩、煤岩储层非均质建模与表征技术方法;②由中-深层储层向超深层储层延伸,研发面向万米深度域的超高温高压储层物理模拟技术,再现高温压条件下复杂流-岩反应过程与储集空间演变路径。智能化方面:①将开发薄片智能鉴定系统,实现“工厂化”薄片鉴定,提升鉴定质量和效率;②将完善实验测试数据大数据分析 and 智能化应用系统,实现实验数据的共享和应用效率。

5 结论

1) 碳酸盐岩沉积学前沿研究取得3大进展:①完善了碳酸盐工厂分类,明确了5类工厂的生产者、生产环境和产物之间的成生关系,为碳酸盐岩沉积环境恢复、源储发育位置确定以及碳酸盐岩“源-汇”体系研究提供了新思路;②系统阐明了微生物造氧固碳、微生物造岩固碳、微生物诱导形成碳酸盐岩组构以及微生物参与沉积演化4大功能,为重建地质历史时期碳循环、大气氧化和生物演化以及碳封存提供了新途径;③盆地级岩相古地理恢复及个性化沉积模式的建立推动了油气勘探向碳酸盐台地内部和深层-超深层古老碳酸盐岩领域拓展。

2) 碳酸盐岩储层研究取得两项进展:①创新白云石形成机理,建立了微生物诱导白云石化、溶蚀-沉淀驱动白云石化和高二氧化硅浓度驱动白云石化3种新模式,为破解“白云石问题”提供了新的理论模型;②阐明了沉积相、白云石化、溶蚀作用和构造改造是储层形成的主控因素,明确了微生物岩储层和断控储层等规模储层形成与分布规律,推动碳酸盐岩油气勘探取得新突破。

3) 指出碳酸盐矿物U-Pb定年、碳酸盐团簇同位素和Mg同位素测试实验技术进展迅速,为储层孔隙演化、储层形成过程和成藏演化恢复提供了利器。但由于碳酸盐矿物在成岩过程中的不稳定性,测试获得的数据也存在地质含义的不确定性,因此,特别强调实验数据的应用一定要结合地质背景,不能唯数据论。

4) 至于未来发展趋势,认为碳酸盐岩沉积学将主要关注古海洋环境的恢复、沉积相和沉积微相数值模拟及智能化识别、构造岩相古地理的重建与岩相古地理图的自动化编制;储层地质学将向沉积+成岩+构造协同演化成储机制方向、深层-超深层碳酸盐岩储层形成演化过程模拟及恢复方向及低级序断裂成储效应与表征方向发展;储层实验技术将向非传统同位素

和定年技术、非常规和超深层储层及实验技术升级换代和智能化发展。

参 考 文 献

- [1] 金之钧,龙胜祥,周雁,等. 中国南方膏盐岩分布特征[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(5): 571-583, 593.
JIN Zhijun, LONG Shengxiang, ZHOU Yan, et al. A study on the distribution of saline-deposit in southern China [J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(5): 571-583, 593.
- [2] 冉隆辉,陈更生,徐仁芬. 中国海相油气田勘探实例(之一)四川盆地罗家寨大型气田的发现和探明[J]. 海相油气地质, 2005, 10(1): 43-47.
RAN Longhui, CHEN Gengsheng, XU Renfen. Discovery and exploration of Luojiashai gas field, Sichuan Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2005, 10(1): 43-47.
- [3] 马永生. 中国海相油气田勘探实例之六四川盆地普光大气田的发现与勘探[J]. 海相油气地质, 2006, 11(2): 35-40.
MA Yongsheng. Cases of discovery and exploration of marine fields in China (part 6): Puguang Gas Field in Sichuan Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2006, 11(2): 35-40.
- [4] 杜金虎,邹才能,徐春春,等. 川中古隆起龙王庙组特大型气田战略发现与理论技术创新[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(3): 268-277.
DU Jinhu, ZOU Caineng, XU Chunchun, et al. Theoretical and technical innovations in strategic discovery of a giant gas field in Cambrian Longwangmiao Formation of central Sichuan paleo-uplift, Sichuan Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(3): 268-277.
- [5] 邹才能,杜金虎,徐春春,等. 四川盆地震旦系-寒武系特大型气田形成分布、资源潜力及勘探发现[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(3): 278-293.
ZOU Caineng, DU Jinhu, XU Chunchun, et al. Formation, distribution, resource potential and discovery of the Sinian-Cambrian giant gas field, Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(3): 278-293.
- [6] 杨海军,邓兴梁,张银涛,等. 塔里木盆地满深1井奥陶系超深断控碳酸盐岩油气藏勘探重大发现及意义[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(3): 13-23.
YANG Haijun, DENG Xingliang, ZHANG Yintao, et al. Great discovery and its significance of exploration for Ordovician ultra-deep fault-controlled carbonate reservoirs of Well Manshen 1 in Tarim Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(3): 13-23.
- [7] 胡素云,李建忠,王铜山,等. 中国石油油气资源潜力分析与勘探选区思考[J]. 石油实验地质, 2020, 42(5): 813-823.
HU Suyun, LI Jianzhong, WANG Tongshan, et al. CNPC oil and gas resource potential and exploration target selection [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2020, 42(5): 813-823.
- [8] FOLK R L. Spectral subdivision of limestone types [M]//HAM W E. Classification of Carbonate Rocks—A Symposium. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1962: 62-84.
- [9] DUNHAM R J. Classification of carbonate rocks according to

- depositional texture [M]//HAM W E. Classification of Carbonate Rocks—A Symposium. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1962: 108–121.
- [10] CHOQUETTE P W, PRAY L C. Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates [J]. AAPG Bulletin, 1970, 54(2): 207–250.
- [11] LUCIA F J. Rock-fabric/petrophysical classification of carbonate pore space for reservoir characterization [J]. AAPG Bulletin, 1995, 79(9): 1275–1300.
- [12] READ J F. Carbonate platform facies models [J]. AAPG Bulletin, 1985, 69(1): 1–21.
- [13] WILSON J L. Summary [M]//WILSON J L. Carbonate Facies in Geologic History. New York: Springer, 1975: 348–379.
- [14] TUCKER M E, WRIGHT V P. Carbonate sedimentology [M]. Oxford: Blackwell Science Ltd, 1990: 1–467.
- [15] SARG J F. The sequence stratigraphy, sedimentology, and economic importance of evaporite-carbonate transitions: A review [J]. Sedimentary Geology, 2001, 140(1/2): 9–34.
- [16] SCHLAGER W. Carbonate sedimentology and sequence stratigraphy [M]. Tulsa: SEPM society for Sedimentary Geology, 2005.
- [17] LUCIA F J. Carbonate reservoir characterization [M]. Berlin: Springer, 1999: 227.
- [18] MOORE C H. Carbonate reservoirs: Porosity evolution and diagenesis in a sequence stratigraphic framework [M]. Amsterdam: Elsevier, 2001: 444.
- [19] SCHLAGER W. Benthic carbonate factories of the Phanerozoic [J]. International Journal of Earth Sciences, 2003, 92(4): 445–464.
- [20] JAMES N P, REID C M, BONE Y, et al. The macroalgal carbonate factory at a cool-to-warm temperate marine transition, Southern Australia [J]. Sedimentary Geology, 2013, 291: 1–26.
- [21] JAMES N P, MATENAAR J, BONE Y. Cool-water Eocene-Oligocene carbonate sedimentation on a paleobathymetric high, Kangaroo Island, southern Australia [J]. Sedimentary Geology, 2016, 341: 216–231.
- [22] REIJMER J J G. Marine carbonate factories: Review and update [J]. Sedimentology, 2021, 68(5): 1729–1796.
- [23] LI Fei, GONG Qiaolin, BURNE R V, et al. Ooid factories operating under hothouse conditions in the earliest Triassic of South China [J]. Global and Planetary Change, 2019, 172: 336–354.
- [24] WANG Jiuyuan, TARHAN Lidya G., JACOBSON Andrew D., et al. The evolution of the marine carbonate factory [J]. Nature, 2023, 615(7951): 265–269.
- [25] WALCOT C D. Cambrian geology and palaeontology III No. 2—Precambrian, Algonkian algal flora [J]. Smithsonian. Miscellan. Collect, 1914, 64: 44–156.
- [26] RIDING R. Microbial carbonates: The geological record of calcified bacterial – algal mats and biofilms [J]. Sedimentology, 2000, 47(S1): 179–214.
- [27] SHAPIRO R S. A comment on the systematic confusion of thrombolites [J]. Palaios, 2000, 15(2): 166–169.
- [28] CATLING D C, ZAHNLE K J. The Archean atmosphere [J]. Science Advances, 2020, 6(9): eaax1420.
- [29] LARGE Ross R. Evolution of Earth's Atmosphere [M]//Alderton D, Elias S A. Encyclopedia of Geology (Second Edition). Oxford: Academic Press, 2021: 571–584.
- [30] CHEN Si, ZENG Min, TIAN Jingchun, et al. Microbe-mediated, marine authigenic formation of ooidal chamosite: Insights from upper Ordovician carbonates of the South-Western Yangtze platform (China) [J]. Sedimentology, 2023, 70(5): 1655–1678.
- [31] DIAZ M R, EBERLI G P. Decoding the mechanism of formation in marine ooids: A review [J]. Earth-Science Reviews, 2019, 190: 536–556.
- [32] DIAZ M R, EBERLI G P. Microbial contribution to early marine cementation [J]. Sedimentology, 2022, 69(2): 798–822.
- [33] DIAZ M R, EBERLI G P, WEGER R J. Indigenous microbial communities as catalysts for early marine cements: An *in vitro* study [J]. The Depositional Record, 2023, 9(3): 437–456.
- [34] 谢树成, 颜佳新, 杨义, 等. 微生物与沉积岩的协同演化 [J]. 沉积学报, 2023, 41(6): 1635–1644.
- XIE Shucheng, YAN Jiaxin, YANG Yi, et al. Coevolution of microorganisms and sedimentary rocks [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2023, 41(6): 1635–1644.
- [35] BURNE R V, MOORE L S. Microbialites; organosedimentary deposits of benthic microbial communities [J]. Palaios, 1987, 2(3): 241–254.
- [36] 胡安平, 沈安江, 郑剑锋, 等. 微生物碳酸盐岩分类、沉积环境与沉积模式 [J]. 海相油气地质, 2021, 26(1): 1–15.
- HU Anping, SHEN Anjiang, ZHENG Jianfeng, et al. The classification, facies and sedimentary models of microbialites [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2021, 26(1): 1–15.
- [37] 吴亚生. 生物岩的分类 [J]. 古地质量, 2023, 25(3): 511–523.
- WU Yasheng. Classification of biolith (biogenic rocks) [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2023, 25(3): 511–523.
- [38] 周进高, 张建勇, 邓红婴, 等. 四川盆地震旦系灯影组岩相古地理与沉积模式 [J]. 天然气工业, 2017, 37(1): 24–31.
- ZHOU Jingao, ZHANG Jianyong, DENG Hongying, et al. Lithofacies paleogeography and sedimentary model of Sinian Dengying Fm in the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(1): 24–31.
- [39] 罗垚, 谭秀成, 赵东方, 等. 埃迪卡拉系微生物碳酸盐岩沉积特征及其地质意义: 以川中磨溪8井区灯影组四段为例 [J]. 古地质量, 2022, 24(2): 278–291.
- LUO Yao, TAN Xiucheng, ZHAO Dongfang, et al. Sedimentary characteristics of the Ediacaran microbial carbonates and their geological implications: A case study of the Member 4 of Dengying Formation from Wellblock MX8 in central Sichuan Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2022, 24(2): 278–291.
- [40] 胡明毅, 孙春燕, 高达. 塔里木盆地寒武统肖尔布拉克组构造-岩相古地理特征 [J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(1): 12–23.
- HU Mingyi, SUN Chunyan, GAO Da. Characteristics of tectonic-lithofacies paleogeography in the Lower Cambrian Xiaerbulake

- Formation, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(1): 12-23.
- [41] 郑剑锋, 黄理力, 袁文芳, 等. 塔里木盆地柯坪地区下寒武统肖尔布拉克组地球化学特征及其沉积和成岩环境意义[J]. *天然气地球科学*, 2020, 31(5): 698-709.
- ZHENG Jianfeng, HUANG Lili, YUAN Wenfang, et al. Geochemical features and its significance of sedimentary and diagenetic environment in the Lower Cambrian Xiaerblak Formation of Keping area, Tarim Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2020, 31(5): 698-709.
- [42] 吴亚生, 姜红霞, 虞功亮, 等. 微生物岩的概念和重庆老龙洞剖面P-T界线地层微生物岩成因[J]. *古地理学报*, 2018, 20(5): 737-775.
- WU Yasheng, JIANG Hongxia, YU Gongliang, et al. Conceptions of microbialites and origin of the Permian-Triassic boundary microbialites from Laolongdong, Chongqing, China[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2018, 20(5): 737-775.
- [43] 胡安平, 沈安江, 张杰, 等. 碳酸盐岩-膏盐岩高频沉积旋回组合生-储特征——以鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组中-下组合为例[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(4): 943-956.
- HU Anping, SHEN Anjiang, ZHANG Jie, et al. Source-reservoir characteristics of high-frequency cyclic carbonate-evaporite assemblages: A case study of the lower and middle assemblages in the Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(4): 943-956.
- [44] 魏柳斌, 王前平, 师平平, 等. 鄂尔多斯盆地碳酸盐岩-膏盐岩体系微生物岩特征、成因及分布[C]//中国矿物岩石地球化学学会岩相古地理专业委员会, 国际古地理学会, 中国矿物岩石地球化学学会沉积学专业委员会, 等. 第十七届全国古地理学及沉积学学术会议摘要集——专题13生物岩的形成机制、古地理及资源、环境意义, 青岛, 2023. 贵阳: 中国矿物岩石地球化学学会岩相古地理专业委员会, 2023: 3-5.
- WEI Liubin, WANG Qianping, SHI Pingping, et al. Characterization, genesis and distribution of microbialites in the carbonate-evaporite system of the Ordos Basin [C]//The Professional Committee of Lithology and Paleogeography of the Chinese Society of Mineral and Rock Geochemistry, International Society of Palaeogeography, Sedimentology Professional Committee of the Chinese Society of Mineral and Rock Geochemistry, et al. Summary of the 17th National Conference on Paleogeography and Sedimentology-Topic 13: Formation Mechanisms, Paleogeography and Resources, and Environmental Significance of Biorocks, Qingdao, 2023. Guiyang: The Professional Committee of Lithology and Paleogeography of the Chinese Society of Mineral and Rock Geochemistry, 2023: 3-5.
- [45] 钟勇, 李亚林, 张晓斌, 等. 四川盆地地下组合张性构造特征[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2013, 40(5): 498-510.
- ZHONG Yong, LI Yalin, ZHANG Xiaobin, et al. Features of extensional structures in pre-Sinian to Cambrian strata, Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2013, 40(5): 498-510.
- [46] 李忠权, 刘记, 李应, 等. 四川盆地震旦系威远—安岳拉张侵蚀槽特征及形成演化[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(1): 26-33.
- LI Zhongquan, LIU Ji, LI Ying, et al. Formation and evolution of Weiyuan-Anyue extension-erosion groove in Sinian system, Sichuan Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(1): 26-33.
- [47] 魏国齐, 杨威, 杜金虎, 等. 四川盆地震旦纪—早寒武世克拉通内裂陷地质特征[J]. *天然气工业*, 2015, 35(1): 24-35.
- WEI Guoqi, YANG Wei, DU Jinhu, et al. Geological characteristics of the Sinian-Early Cambrian intracratonic rift, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2015, 35(1): 24-35.
- [48] 刘殊, 甯濛, 谢刚平. 川西坳陷古坳拉槽的地质意义及礁滩相天然气藏勘探潜力[J]. *天然气工业*, 2015, 35(7): 17-26.
- LIU Shu, NING Meng, XIE Gangping. Geological significance of paleo-aulacogen and exploration potential of reef flat gas reservoir in the Western Sichuan Depression [J]. *Natural Gas Industry*, 2015, 35(7): 17-26.
- [49] 杨雨, 王一刚, 文应初, 等. 川东飞仙关组沉积相与鲕滩气藏的分布[J]. *天然气勘探与开发*, 2001, 24(3): 18-21.
- YANG Yu, WANG Yigang, WEN Yingchu, et al. The sedimentary facies and the distribution of oolitic reservoir in the Feixianguan Formation, northeastern Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2001, 24(3): 18-21.
- [50] 王一刚, 张静, 刘兴刚, 等. 四川盆地东北部下三叠统飞仙关组碳酸盐蒸发台地沉积相[J]. *古地理学报*, 2005, 7(3): 357-371.
- WANG Yigang, ZHANG Jing, LIU Xinggang, et al. Sedimentary facies of evaporative carbonate platform of the Feixianguan Formation of Lower Triassic in northeastern Sichuan Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2005, 7(3): 357-371.
- [51] 陈友智, 付金华, 杨高印, 等. 鄂尔多斯地块中元古代长城纪盆地属性研究[J]. *岩石学报*, 2016, 32(3): 856-864.
- CHEN Youzhi, FU Jinhua, YANG Gaoyin, et al. Researches on basin property of Ordos block during Mesoproterozoic Changcheng period[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2016, 32(3): 856-864.
- [52] 管树巍, 吴林, 任荣, 等. 中国主要克拉通前寒武纪裂谷分布与油气勘探前景[J]. *石油学报*, 2017, 38(1): 9-22.
- GUAN Shuwei, WU Lin, REN Rong, et al. Distribution and petroleum prospect of Precambrian rifts in the main cratons, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 38(1): 9-22.
- [53] 王坤, 王铜山, 汪泽成, 等. 华北克拉通南缘长城系裂谷特征与油气地质条件[J]. *石油学报*, 2018, 39(5): 504-517.
- WANG Kun, WANG Tongshan, WANG Zecheng, et al. Characteristics and hydrocarbon geological conditions of the Changchengian rifts in the southern North China Craton [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2018, 39(5): 504-517.
- [54] 宋文海. 乐山—龙女寺古隆起大中型气田成藏条件研究[J]. *天然气工业*, 1996, 16(增刊1): 13-26, 105-106.
- SONG Wenhai. Research on reservoir-formed conditions of large-medium gas fields of Leshan-Longnusi palaeohigh [J]. *Natural Gas Industry*, 1996, 16(S1): 13-26, 105-106.
- [55] 许海龙, 魏国齐, 贾承造, 等. 乐山—龙女寺古隆起构造演化及对震旦系成藏的控制[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(4):

- 406–416.
- XU Hailong, WEI Guoqi, JIA Chengzao, et al. Tectonic evolution of the Leshan-Longnusi paleo-uplift and its control on gas accumulation in the Sinian strata, Sichuan Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(4): 406–416.
- [56] 何登发, 周新源, 杨海军, 等. 塔里木盆地克拉通内古隆起的成因机制与构造类型[J]. *地学前缘*, 2008, 15(2): 207–221.
- HE Dengfa, ZHOU Xinyuan, YANG Haijun, et al. Formation mechanism and tectonic types of intracratonic paleo-uplifts in the Tarim Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15 (2): 207–221.
- [57] 付金华, 孙六一, 冯强汉, 等. 鄂尔多斯盆地地下古生界海相碳酸盐岩油气地质与勘探[M]. 北京: 石油工业出版社, 2018: 10.
- FU Jinhua, SUN Liuyi, FENG Qianghan, et al. Oil & gas geology and exploration of Lower Paleozoic marine carbonate rocks in Ordos Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2018: 10.
- [58] IRWIN M L. General theory of epeiric clear water sedimentation [J]. *AAPG Bulletin*, 1965, 49(4): 445–459.
- [59] BURCHETTE T P, WRIGHT V P. Carbonate ramp depositional systems[J]. *Sedimentary Geology*, 1992, 79(1/4): 3–57.
- [60] BOSENCE Dan. A genetic classification of carbonate platforms based on their basinal and tectonic settings in the Cenozoic [J]. *Sedimentary Geology*, 2005, 175(1/4): 49–72.
- [61] EBERLI G P, BETZLER C. Characteristics of modern carbonate contourite drifts[J]. *Sedimentology*, 2019, 66(4): 1163–1191.
- [62] DIAZ M R, PIGGOT A M, EBERLI G P, et al. Bacterial community of oolitic carbonate sediments of the Bahamas Archipelago [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2013, 485: 9–24.
- [63] AURELL M, BÁDENAS B. Facies architecture of a microbial-siliceous sponge-dominated carbonate platform: The Bajocian of Moscardón (Middle Jurassic, Spain) [M]//BOSENCE D W J, GIBBONS K A, LE HERON D P, et al. *Microbial Carbonates in Space and Time: Implications for Global Exploration and Production*. London: Geological Society of London, 2015: 155–174.
- [64] PETROVIC A, LÜDMANN T, AFIFI A M, et al. Fragmentation, rafting, and drowning of a carbonate platform margin in a rift-basin setting[J]. *Geology*, 2023, 51(3): 242–246.
- [65] BETZLER C, LINDHORST S, REIJMER J J G, et al. Carbonate platform drowning caught in the act: The sedimentology of Saya de Malha Bank (Indian Ocean)[J]. *Sedimentology*, 2023, 70(1): 78–99.
- [66] 姚根顺, 周进高, 邹伟宏, 等. 四川盆地寒武统龙王庙组颗粒滩特征及分布规律[J]. *海相油气地质*, 2013, 18(4): 1–8.
- YAO Genshun, ZHOU Jingao, ZOU Weihong, et al. Characteristics and distribution rule of Lower Cambrian Longwangmiao grain beach in Sichuan basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2013, 18(4): 1–8.
- [67] 周进高, 刘新社, 沈安江, 等. 中国海相含油气盆地构造-岩相古地理特征[J]. *海相油气地质*, 2019, 24(4): 27–37.
- ZHOU Jingao, LIU Xinshe, SHEN Anjiang, et al. The characteristics of tectonic-lithofacies paleogeography of marine petroliferous basins of China [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2019, 24(4): 27–37.
- [68] 周进高, 姚根顺, 杨光, 等. 四川盆地栖霞组—茅口组岩相古地理与天然气有利勘探区带[J]. *天然气工业*, 2016, 36(4): 8–15.
- ZHOU Jingao, YAO Genshun, YANG Guang, et al. Lithofacies palaeogeography and favorable gas exploration zones of Qixia and Maokou Fms in the Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2016, 36(4): 8–15.
- [69] 杨伟强, 刘正, 陈浩如, 等. 四川盆地寒武统龙王庙组颗粒滩沉积组合及其对储集层的控制作用[J]. *古地理学报*, 2020, 22(2): 251–265.
- YANG Weiqiang, LIU Zheng, CHEN Haoru, et al. Depositional combination of carbonate grain banks of the Lower Cambrian Longwangmiao Formation in Sichuan Basin and its control on reservoirs [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2020, 22 (2): 251–265.
- [70] EHRENBERG S N. The etiology of carbonate porosity [J]. *AAPG Bulletin*, 2022, 106(12): 2351–2386.
- [71] 王广伟. 白云岩化作用与白云岩孔隙的形成——来自实验模拟交代反应的启示[J]. *沉积学报*, 2024, 42(2): 632–642.
- WANG Guangwei. Dolomitization and dolomite pore formation: Insights from experimentally simulated replacement [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2024, 42(2): 632–642.
- [72] LAND L S. Failure to precipitate dolomite at 25 °C from dilute solution despite 1000-fold oversaturation after 32 years [J]. *Aquatic Geochemistry*, 1998, 4(3): 361–368.
- [73] GREGG J M, BISH D L, KACZMAREK S E, et al. Mineralogy, nucleation and growth of dolomite in the laboratory and sedimentary environment: A review [J]. *Sedimentology*, 2015, 62 (6): 1749–1769.
- [74] MCKENZIE J A, VASCONCELOS C R. Dolomite mountains and the origin of the dolomite rock of which they mainly consist: Historical developments and new perspectives [J]. *Sedimentology*, 2009, 56(1): 205–219.
- [75] LI Mingtao, WIGNALL P B, DAI Xu, et al. Phanerozoic variation in dolomite abundance linked to oceanic anoxia [J]. *Geology*, 2021, 49(6): 698–702.
- [76] WACEY D, WRIGHT D T, BOYCE A J. A stable isotope study of microbial dolomite formation in the Coorong Region, South Australia [J]. *Chemical Geology*, 2007, 244(1/2): 155–174.
- [77] SÁNCHEZ-ROMÁN M, MCKENZIE J A, DE LUCA REBELLO WAGENER A, et al. Presence of sulfate does not inhibit low-temperature dolomite precipitation [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 285(1/2): 131–139.
- [78] ROBERTS J A, KENWARD P A, FOWLE D A, et al. Surface chemistry allows for abiotic precipitation of dolomite at low temperature [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(36): 14540–14545.
- [79] XU Fan, LIN Changsong, YOU Xuelian, et al. Microbial dolomite in culture experiment and natural environments: Implication for dolomite genesis [J]. *Geomicrobiology Journal*, 2021, 38(4): 365–374.

- [80] 由雪莲, 孙枢, 朱井泉, 等. 微生物白云岩模式研究进展[J]. 地质前缘, 2011, 18(4): 52–64.
YOU Xuelian, SUN Shu, ZHU Jingquan, et al. Progress in the study of microbial dolomite model [J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(4): 52–64.
- [81] 许杨阳, 刘邓, 于娜, 等. 微生物(有机)白云石成因模式研究进展与思考[J]. 地球科学, 2018, 43(增刊1): 63–70.
XU Yangyang, LIU Deng, YU Na, et al. Advance and review on microbial/organogenic dolomite model [J]. Earth Science, 2018, 43(S1): 63–70.
- [82] 赵东方, 谭秀成, 罗冰, 等. 微生物诱导白云石沉淀研究进展及面临的挑战[J]. 沉积学报, 2022, 40(2): 335–349.
ZHAO Dongfang, TAN Xiucheng, LUO Bing, et al. A review of microbial dolomite: Advances and challenges [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(2): 335–349.
- [83] 刘邓, 曹锦鹏, 杨珊珊, 等. 微生物异化还原水铁矿介导的Ca-Fe碳酸盐矿物形成: 对铁白云石成因的启示[J]. 中国科学: 地球科学, 2024, 54(1): 216–230.
LIU Deng, CAO Jinpeng, YANG Shanshan, et al. Microbially-mediated formation of Ca-Fe carbonates during dissimilatory ferrihydrite reduction: Implications for the origin of sedimentary ankerite [J]. Science China Earth Sciences, 2024, 54(1): 216–230.
- [84] LIU Deng, CHEN Ting, DAI Zhaoyi, et al. A non-classical crystallization mechanism of microbially-induced disordered dolomite[J/OL]. Geochimica et Cosmochimica Acta: 页码范围缺失 [网络访问日期缺失]. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2024.05.005>.
- [85] 林孝先, 彭军, 侯中健, 等. 四川汉源—峨边地区上震旦统灯影组藻白云岩特征及成因研究[J]. 沉积学报, 2018, 36(1): 57–71.
LIN Xiaoxian, PENG Jun, HOU Zhongjian, et al. Study on characteristics and geneses of algal dolostone of the Upper Sinian Dengying Formation in the Hanyuan-Ebian area of Sichuan Province, China [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2018, 36(1): 57–71.
- [86] KIM J, KIMURA Y, PUCHALA B, et al. Dissolution enables dolomite crystal growth near ambient conditions [J]. Science, 2023, 382(6673): 915–920.
- [87] HASHIM M S, ROSE K G, COHEN H F, et al. Effects of sodium and potassium concentrations on dolomite formation rate, stoichiometry and crystallographic characteristics [J]. Sedimentology, 2023, 70(7): 2355–2370.
- [88] FANG Yihang, HOBBS F, YANG Yiping, et al. Dissolved silica-driven dolomite precipitation in the Great Salt Lake, Utah, and its implication for dolomite formation environments [J]. Sedimentology, 2023, 70(4): 1328–1347.
- [89] LI Rong, WANG Yongxiao, WANG Zecheng, et al. Geological characteristics of the southern segment of the Late Sinian—Early Cambrian Deyang—Anyue rift trough in Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(2): 321–333.
- [90] SALLER A, WINTERBOTTOM C. Deep marine diagenesis, offshore Hawaii and Enewetak, with implications for older carbonates [J]. The Depositional Record, 2023, 9(3): 526–572.
- [91] PERRI E, TUCKER M. Bacterial fossils and microbial dolomite in Triassic stromatolites [J]. Geology, 2007, 35(3): 207–210.
- [92] YOU Xuelian, SUN Shu, ZHU Jingquan, et al. Microbially mediated dolomite in Cambrian stromatolites from the Tarim Basin, north-west China: Implications for the role of organic substrate on dolomite precipitation [J]. Terra Nova, 2013, 25(5): 387–395.
- [93] GUO Pei, WEN Huaguo, LI Changzhi, et al. Tectonic and climatic controls on carbonate sedimentation in active orogen proximal lakes, Cenozoic Qaidam Basin, northern Tibetan Plateau [J]. Basin Research, 2023, 35(5): 1744–1771.
- [94] GUO Pei, WEN Huaguo, LI Changzhi, et al. Lacustrine dolomite in deep time: What really matters in early dolomite formation and accumulation? [J]. Earth-Science Reviews, 2023, 246: 104575.
- [95] GUO Pei, WEN Huaguo, SÁNCHEZ-ROMÁN M. Constraints on dolomite formation in a Late Palaeozoic saline alkaline lake deposit, Junggar Basin, north-west China [J]. Sedimentology, 2023, 70(7): 2302–2330.
- [96] RAUDSEPP M J, WILSON S A, MORGAN B, et al. Non-classical crystallization of very high magnesium calcite and magnesite in the Coorong Lakes, Australia [J]. Sedimentology, 2022, 69(5): 2246–2266.
- [97] EHRENBERG S N, EBERLI G P, BAECHLE G. Porosity-permeability relationships in Miocene carbonate platforms and slopes seaward of the Great Barrier Reef, Australia (ODP Leg 194, Marion Plateau) [J]. Sedimentology, 2006, 53(6): 1289–1318.
- [98] IMMENHAUSER A. On the delimitation of the carbonate burial realm [J]. The Depositional Record, 2022, 8(2): 524–574.
- [99] 金之钧. 中国海相碳酸盐岩层系油气形成与富集规律[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(7): 910–926.
JIN Zhijun. Formation and accumulation of oil and gas in marine carbonate strata in Chinese sedimentary basins [J]. Science China Earth Sciences, 2011, 41(7): 910–926.
- [100] 赵文智, 沈安江, 乔占峰, 等. 白云岩成因类型、识别特征及储集空间成因[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(6): 923–935.
ZHAO Wenzhi, SHEN Anjiang, QIAO Zhanfeng, et al. Genetic types and distinguished characteristics of dolomite and the origin of dolomite reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(6): 923–935.
- [101] 赵文智, 沈安江, 乔占峰, 等. 中国碳酸盐岩沉积储层理论进展与海相大油气田发现[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(4): 1–15.
ZHAO Wenzhi, SHEN Anjiang, QIAO Zhanfeng, et al. Theoretical progress in carbonate reservoir and discovery of large marine oil and gas fields in China [J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(4): 1–15.
- [102] 沈安江, 赵文智, 胡安平, 等. 海相碳酸盐岩储集层发育主控因素[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(5): 545–554.
SHEN Anjiang, ZHAO Wenzhi, HU Anping, et al. Major factors controlling the development of marine carbonate reservoirs [J].

- Petroleum Exploration and Development, 2015, 42 (5): 545-554.
- [103] 沈安江, 罗宪婴, 胡安平, 等. 从准同生到埋藏环境的白云石化路径及其成储效应[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(4): 637-647.
- SHEN Anjiang, LUO Xianying, HU Anping, et al. Dolomitization evolution and its effects on hydrocarbon reservoir formation from penecontemporaneous to deep burial environment [J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49 (4): 637-647.
- [104] ZHOU Jingao, DENG Hongying, YU Zhou, et al. The genesis and prediction of dolomite reservoir in reef-shoal of Changxing Formation-Feixianguan Formation in Sichuan Basin[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 178: 324-335.
- [105] 周进高, 徐春春, 姚根顺, 等. 四川盆地寒武统龙王庙组储集层形成与演化[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(2): 158-166.
- ZHOU Jingao, XU Chunchun, YAO Genshun, et al. Genesis and evolution of Lower Cambrian Longwangmiao Formation reservoirs, Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(2): 158-166.
- [106] 周进高, 郝毅, 邓红婴, 等. 四川盆地中西部栖霞组—茅口组孔洞型白云岩储层成因与分布[J]. 海相油气地质, 2019, 24(4): 77-88.
- ZHOU Jingao, HAO Yi, DENG Hongying, et al. Genesis and distribution of vuggy dolomite reservoirs of the Lower Permian Qixia Formation and Maokou Formation, western-central Sichuan Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2019, 24 (4): 77-88.
- [107] 胡安平, 沈安江, 杨翰轩, 等. 碳酸盐岩-膏盐岩共生体系白云岩成因及储盖组合[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(5): 916-928.
- HU Anping, SHEN Anjiang, YANG Hanxuan, et al. Dolomite genesis and reservoir-cap rock assemblage in carbonate-evaporite paragenesis system[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(5): 916-928.
- [108] 李文正, 周进高, 张建勇, 等. 四川盆地洗象池组储集层的主控因素与有利区分布[J]. 天然气工业, 2016, 36(1): 52-60.
- LI Wenzheng, ZHOU Jingao, ZHANG Jianyong, et al. Main controlling factors and favorable zone distribution of Xixiangchi Formation reservoirs in the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(1): 52-60.
- [109] 徐哲航, 兰才俊, 郝芳, 等. 四川盆地震旦系灯影组不同古地理环境下丘滩储集体的差异性[J]. 古地理学报, 2020, 22(2): 235-250.
- XU Zhehang, LAN Caijun, HAO Fang, et al. Difference of mound-bank complex reservoir under different palaeogeographic environment of the Sinian Dengying Formation in Sichuan Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2020, 22(2): 235-250.
- [110] 赵文智, 沈安江, 胡安平, 等. 塔里木、四川和鄂尔多斯盆地海相碳酸盐岩规模储层发育地质背景初探[J]. 岩石学报, 2015, 31(11): 3495-3508.
- ZHAO Wenzhi, SHEN Anjiang, HU Anping, et al. A discussion on the geological background of marine carbonate reservoirs development in Tarim, Sichuan and Ordos Basin, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 31(11): 3495-3508.
- [111] 赵文智, 汪泽成, 黄福喜, 等. 中国陆上叠合盆地超深层油气成藏条件与勘探地位[J]. 石油学报, 2023, 44(12): 2020-2032.
- ZHAO Wenzhi, WANG Zecheng, HUANG Fuxi, et al. Hydrocarbon accumulation conditions and exploration position of ultra-deep reservoirs in onshore superimposed basins of China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2023, 44(12): 2020-2032.
- [112] KOESHIDAYATULLAH A, CORLETT H, HOLLIS C. An overview of structurally-controlled dolostone-limestone transitions in the stratigraphic record [J]. Earth-Science Reviews, 2021, 220: 103751.
- [113] KOESHIDAYATULLAH A, AL-SINAWI N, SWART P K, et al. Coevolution of diagenetic fronts and fluid-fracture pathways [J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 9278.
- [114] KOESHIDAYATULLAH A, CORLETT H, STACEY J, et al. Evaluating new fault-controlled hydrothermal dolomitization models: Insights from the Cambrian Dolomite, Western Canadian Sedimentary Basin [J]. Sedimentology, 2020, 67 (6): 2945-2973.
- [115] GASPARRINI M, MORAD D, MANGENOT X, et al. Dolomite recrystallization revealed by $\Delta_{47}/U-Pb$ thermochronometry in the Upper Jurassic Arab Formation, United Arab Emirates [J]. Geology, 2023, 51(5): 471-475.
- [116] ARAÚJO C C, MADRUCCI V, HOMEWOOD P, et al. Stratigraphic and sedimentary constraints on presalt carbonate reservoirs of the South Atlantic Margin, Santos Basin, offshore Brazil[J]. AAPG Bulletin, 2022, 106(12): 2513-2546.
- [117] TAMOTO H, PESTILHO A L S, RUMBELSPERGER A M B. Impacts of diagenetic processes on petrophysical characteristics of the Aptian presalt carbonates of the Santos Basin, Brazil [J]. AAPG Bulletin, 2024, 108(1): 75-105.
- [118] SOARES M V T, DA SILVA BOMFIM L, VIDAL A C, et al. Presalt carbonate cyclicity and depositional environment: NMR petrophysics and Markov cyclicity of lacustrine acoustic facies (Santos Basin, Brazil) [J]. Marine and Petroleum Geology, 2023, 157: 106494.
- [119] BAPTISTA R J, FERRAZ A E, SOMBRA C, et al. The presalt Santos Basin, a super basin of the twenty-first century[J]. AAPG Bulletin, 2023, 107(8): 1369-1389.
- [120] 姚根顺, 郝毅, 周进高, 等. 四川盆地震旦系灯影组储层储集空间的形成与演化[J]. 天然气工业, 2014, 34(3): 31-37.
- YAO Genshun, HAO Yi, ZHOU Jingao, et al. Formation and evolution of reservoir spaces in the Sinian Dengying Fm of the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(3): 31-37.
- [121] 周进高, 姚根顺, 杨光, 等. 四川盆地安岳大气田震旦系—寒武系储层的发育机制[J]. 天然气工业, 2015, 35(1): 36-44.
- ZHOU Jingao, YAO Genshun, YANG Guang, et al. Genesis mechanism of the Sinian-Cambrian reservoirs in the Anyue Gas Field, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(1): 36-44.

- [122] XU Zhehang, LAN Caijun, ZHANG Benjian, et al. Impact of diagenesis on the microbial reservoirs of the terminal Ediacaran Dengying Formation from the Central to Northern Sichuan Basin, SW China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2022, 146: 105924.
- [123] 徐哲航, 兰才俊, 马肖琳, 等. 四川盆地震旦系灯影组丘滩体储层沉积模式与物性特征[J]. *地球科学*, 2020, 45(4): 1281-1294.
- XU Zhehang, LAN Caijun, MA Xiaolin, et al. Sedimentary models and physical properties of mound-shoal complex reservoirs in Sinian Dengying Formation, Sichuan Basin [J]. *Earth Science*, 2020, 45(4): 1281-1294.
- [124] 杨雨, 黄先平, 张健, 等. 四川盆地寒武系沉积前震旦系顶界岩溶地貌特征及其地质意义[J]. *天然气工业*, 2014, 34(3): 38-43.
- YANG Yu, HUANG Xianping, ZHANG Jian, et al. Features and geologic significances of the top Sinian karst landform before the Cambrian deposition in the Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(3): 38-43.
- [125] 杨威, 魏国齐, 赵蓉蓉, 等. 四川盆地震旦系灯影组岩溶储层特征及展布[J]. *天然气工业*, 2014, 34(3): 55-60.
- YANG Wei, WEI Guoqi, ZHAO Rongrong, et al. Characteristics and distribution of karst reservoirs in the Sinian Dengying Fm, Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(3): 55-60.
- [126] 郑剑锋, 潘文庆, 沈安江, 等. 塔里木盆地柯坪露头区寒武系肖尔布拉克组储集层地质建模及其意义[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(3): 499-511.
- ZHENG Jianfeng, PAN Wenqing, SHEN Anjiang, et al. Reservoir geological modeling and significance of Cambrian Xiaerbulak Formation in Keping outcrop area, Tarim Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(3): 499-511.
- [127] 王振宇, 宁科科, 屈海洲, 等. 阿克苏地区寒武系肖尔布拉克组不同白云岩的孔隙特征、成因及演化[J]. *沉积学报*, 2023, 41(1): 256-269.
- WANG Zhenyu, NING Keke, QU Haizhou, et al. Pore characteristics, origin, and evolution of different dolomites in the Cambrian Xiaerbulak Formation in the Aksu area [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2023, 41(1): 256-269.
- [128] 沈安江, 胡安平, 张杰, 等. 微生物碳酸盐岩“三因素”控储地质认识和分布规律[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(3): 582-596.
- SHEN Anjiang, HU Anping, ZHANG Jie, et al. “Three-factor” driven microbial carbonate reservoirs and their distribution [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(3): 582-596.
- [129] 吕修祥, 李建交, 汪伟光. 海相碳酸盐岩储层对断裂活动的响应[J]. *地质科技情报*, 2009, 28(3): 1-5, 9.
- LYU Xiuxiang, LI Jianjiao, WANG Weiguang. Responses of marine carbonate reservoirs to fault activities [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2009, 28(3): 1-5, 9.
- [130] 鲁新便, 胡文革, 汪彦, 等. 塔河地区碳酸盐岩断溶体油藏特征与开发实践[J]. *石油与天然气地质*, 2015(3): 347-355.
- LU Xinbian, HU Wenge, WANG Yan, et al. Characteristics and development practice of fault-karst carbonate reservoirs in Tahe area, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2015(3): 347-355.
- [131] 焦方正. 塔里木盆地顺北特深碳酸盐岩断溶体油气藏发现意义与前景[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(2): 207-216.
- JIAO Fangzheng. Significance and prospect of ultra-deep carbonate fault-karst reservoirs in Shunbei area, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(2): 207-216.
- [132] 丁志文, 汪如军, 陈方方, 等. 断溶体油气藏成因、成藏及油气富集规律——以塔里木盆地哈拉哈塘油田塔河南岸地区奥陶系为例[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(2): 286-296.
- DING Zhiwen, WANG Rujun, CHEN Fangfang, et al. Origin, hydrocarbon accumulation and oil-gas enrichment of fault-karst carbonate reservoirs: A case study of Ordovician carbonate reservoirs in South Tahe area of Halahatang Oilfield, Tarim Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(2): 286-296.
- [133] 王清华. 塔里木盆地富满油田凝析气藏成因[J]. *石油勘探与开发*, 2023, 50(6): 1128-1139.
- WANG Qinghua. Origin of gas condensate reservoir in Fuman Oilfield, Tarim Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(6): 1128-1139.
- [134] 何晓, 唐青松, 邬光辉, 等. 四川盆地安岳气田震旦系走滑断裂控储作用[J]. *石油勘探与开发*, 2023, 50(6): 1116-1127.
- HE Xiao, TANG Qingsong, WU Guanghui, et al. Control of strike-slip faults on Sinian carbonate reservoirs in Anyue Gas Field, Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(6): 1116-1127.
- [135] 梁瀚, 唐浩, 冉崎, 等. 四川盆地川中地区走滑断裂的分布、类型与成因[J]. *地质学报*, 2023, 97(8): 2609-2620.
- LIANG Han, TANG Hao, RAN Qi, et al. The distribution, type and origin of the strike-slip faults in the central Sichuan Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2023, 97(8): 2609-2620.
- [136] 邬光辉, 邹禹, 徐伟, 等. 四川盆地川中古隆起北斜坡震旦系走滑断裂分布及其勘探意义[J]. *天然气工业*, 2023, 43(7): 35-43.
- WU Guanghui, ZOU Yu, XU Wei, et al. Distribution and petroleum exploration significance of Sinian strike-slip faults in the northern slope of Central Sichuan paleouplift [J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43(7): 35-43.
- [137] 冯建伟, 郭宏辉, 汪如军, 等. 塔里木盆地塔北地区深层走滑断裂分段性成因机制[J]. *地球科学*, 2023, 48(7): 2506-2519.
- FENG Jianwei, GUO Honghui, WANG Rujun, et al. Segmentation genesis mechanism of strike-slip fracture of deep carbonate rocks in Tabei area, Tarim Basin [J]. *Earth Science*, 2023, 48(7): 2506-2519.
- [138] 陈红汉. 我国大型克拉通叠合盆地的走滑构造与油气聚集研究进展[J]. *地球科学*, 2023, 48(6): 2039-2066.
- CHEN Honghan. Advances on relationship between strike-slip structures and hydrocarbon accumulations in large superimposed craton basins, China [J]. *Earth Science*, 2023, 48(6): 2039-2066.
- [139] 付晓飞, 冯军, 王海学, 等. 走滑断裂“分期-异向”变形过程砂箱物理模拟: 以塔里木盆地顺北5号断层北段为例[J]. *地球科学*, 2023, 48(6): 2104-2116.

- FU Xiaofei, FENG Jun, WANG Haixue, et al. Sandbox physical simulation on “different period-different direction” deformation process of strike-slip faults: A case study of northern segment of Shunbei no. 5 fault in Tarim Basin[J]. *Earth Science*, 2023, 48(6): 2104–2116.
- [140] 付小东, 张本健, 汪泽成, 等. 四川盆地中西部走滑断裂及其对油气成藏控制作用[J]. *地球科学*, 2023, 48(6): 2221–2237.
- FU Xiaodong, ZHANG Benjian, WANG Zecheng, et al. Strike-slip faults in central and western Sichuan Basin and their control functions on hydrocarbon accumulation[J]. *Earth Science*, 2023, 48(6): 2221–2237.
- [141] 张威, 杨明慧, 李春堂, 等. 鄂尔多斯盆地大牛地区块板内走滑断裂构造特征及演化[J]. *地球科学*, 2023, 48(6): 2267–2280.
- ZHANG Wei, YANG Minghui, LI Chuntang, et al. Structural characteristics and evolution of intraplate strike-slip faults in Daniudi Block, Ordos Basin[J]. *Earth Science*, 2023, 48(6): 2267–2280.
- [142] 宋金民, 王佳蕊, 刘树根, 等. 含海泡石层系泥质灰岩中自生黏土矿物的类型、组成与成岩演化过程——以川东地区中二叠统茅口组茅一段为例[J]. *石油勘探与开发*, 2024, 51(2): 311–322.
- SONG Jinmin, WANG Jiarui, LIU Shugen, et al. Types, composition and diagenetic evolution of authigenic clay minerals in argillaceous limestone of sepiolite-bearing strata: A case study of Mao-1 Member of Middle Permian Maokou Formation, eastern Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51(2): 311–322.
- [143] 李强, 师江波, 周聪, 等. 四川盆地中部合川—潼南地区茅一段泥灰岩储层特征与评价[J]. *天然气地球科学*, 2022, 33(12): 1986–1996.
- LI Qiang, SHI Jiangbo, ZHOU Cong, et al. Characteristics and evaluation of muddy limestone reservoir in the first member of Maokou Formation of Hechuan-Tongnan area, central Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2022, 33(12): 1986–1996.
- [144] 江青春, 汪泽成, 苏旺, 等. 四川盆地中二叠统茅口组一段泥灰岩源内非常规天然气成藏条件及有利勘探方向[J]. *中国石油勘探*, 2021, 26(6): 82–97.
- JIANG Qingchun, WANG Zecheng, SU Wang, et al. Accumulation conditions and favorable exploration orientation of unconventional natural gas in the marl source rock of the first member of the Middle Permian Maokou Formation, Sichuan Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2021, 26(6): 82–97.
- [145] 诸丹诚, 喻雅敏, 黎霆, 等. 四川盆地北部元坝地区茅口组岩溶: 发育特征与分布模式[J]. *古地理学报*, 2023, 25(3): 701–714.
- ZHU Dancheng, YU Yamin, LI Ting, et al. Karst development and distribution pattern of the Maokou Formation in Yuanba area, northern Sichuan Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2023, 25(3): 701–714.
- [146] 汪泽成, 辛勇光, 谢武仁, 等. 川中地区三叠系雷口坡组泥灰岩油气地质特征及充探1井发现意义[J]. *石油勘探与开发*, 2023, 50(5): 950–961.
- WANG Zecheng, XIN Yongguang, XIE Wuren, et al. Petroleum geology of marl in Triassic Leikoupo Formation and discovery significance of Well Chongtan1 in central Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(5): 950–961.
- [147] 辛勇光, 文龙, 张豪, 等. 四川盆地中三叠统雷口坡组储层特征与勘探领域探讨[J]. *中国石油勘探*, 2022, 27(4): 91–102.
- XIN Yongguang, WEN Long, ZHANG Hao, et al. Study on reservoir characteristics and exploration field of the Middle Triassic Leikoupo Formation in Sichuan Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2022, 27(4): 91–102.
- [148] 谢武仁, 文龙, 汪泽成, 等. 四川盆地二叠系—中三叠统海相非常规资源类型及有利勘探方向[J]. *天然气地球科学*, 2024, 35(6): 961–971.
- XIE Wuren, WEN Long, WANG Zecheng, et al. Types of unconventional marine resources and favorable exploration directions in the Permian-Middle Triassic of the Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2024, 35(6): 961–971.
- [149] 梁兴, 徐政语, 栗维民, 等. 蜀南—渝西地区中二叠统茅一段灰质源岩气储层特征及主控因素——以DB1井为例[J]. *石油实验地质*, 2023, 45(4): 714–725.
- LIANG Xing, XU Zhengyu, LI Weimin, et al. Characteristics and main controlling factors of the limy source rock gas reservoir in the first member of the Middle Permian Maokou Formation in the southern Sichuan and western Chongqing area: A case study of Well DB1[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2023, 45(4): 714–725.
- [150] YANAY N, WANG Zhennan, DETTMAN D L, et al. Rapid and precise measurement of carbonate clumped isotopes using laser spectroscopy[J]. *Science Advances*, 2022, 8(43): eabq0611.
- [151] PEREZ-BELTRAN S, ZAHEER W, SUN Zeyang, et al. Density functional theory and ab initio molecular dynamics reveal atomistic mechanisms for carbonate clumped isotope reordering[J]. *Science Advances*, 2023, 9(26): eadf1701.
- [152] FIEBIG J, BAJNAI D, LÖFFLER N, et al. Combined high-precision Δ_{48} and Δ_{47} analysis of carbonates [J]. *Chemical Geology*, 2019, 522: 186–191.
- [153] BAJNAI D, GUO Weifu, SPÖTL C, et al. Dual clumped isotope thermometry resolves kinetic biases in carbonate formation temperatures[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 4005.
- [154] SWART P K, LU Chaojin, MOORE E W, et al. A calibration equation between Δ_{48} values of carbonate and temperature[J]. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2021, 35(17): e9147.
- [155] DICKSON J A D, HODELL D A, SWART P K, et al. Clumped isotope analysis of zoned calcite cement, Carboniferous, Isle of Man[J]. *The Depositional Record*, 2023, 9(3): 635–646.
- [156] GOLDBERG S L, PRESENT T M, FINNEGAN S, et al. A high-resolution record of early Paleozoic climate[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, 118(6): e2013083118.
- [157] FERNANDEZ A, KORTE C, ULLMANN C V, et al. Reconstructing the magnitude of Early Toarcian (Jurassic)

- warming using the reordered clumped isotope compositions of belemnites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2021, 293: 308–327.
- [158] 邱楠生, 刘鑫, 熊昱杰, 等. 碳酸盐团簇同位素在海相盆地热史研究中的进展[J]. *石油实验地质*, 2023, 45(5): 891–903.
- QIU Nansheng, LIU Xin, XIONG Yujie, et al. Progress in the study of carbonate clumped isotope in the thermal history of marine basins[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2023, 45(5): 891–903.
- [159] 胡安平, 沈安江, 陈亚娜, 等. 基于U-Pb同位素年龄和团簇同位素(Δ_{47})温度约束的四川盆地震旦系灯影组构造—埋藏史重建[J]. *石油实验地质*, 2021, 43(5): 896–905, 914.
- HU Anping, SHEN Anjiang, CHEN Yana, et al. Reconstruction of tectonic-burial evolution history of Sinian Dengying Formation in Sichuan Basin based on the constraints of in-situ laser ablation U-Pb date and clumped isotopic thermometer (Δ_{47})[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2021, 43(5): 896–905, 914.
- [160] PING Hongwei, DENG Wenfeng, CHEN Honghan, et al. Fluid inclusion calibration of clumped-isotope solid-state reordering in dolomite: Implication for thermal history reconstruction in deeply buried reservoirs[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2024, 163: 106773.
- [161] 乔占峰, 于洲, 余敏, 等. 中国古老超深层海相碳酸盐岩储集层成因研究新进展[J]. *古地质量*, 2023, 25(6): 1257–1276.
- QIAO Zhanfeng, YU Zhou, SHE Min, et al. Progresses on ancient ultra-deeply buried marine carbonate reservoir in China[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2023, 25(6): 1257–1276.
- [162] 刘嘉庆, 李忠, 颜梦珂, 等. 塔里木盆地塔中地区下奥陶统白云岩的成岩流体演化: 来自团簇同位素的证据[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(1): 68–82.
- LIU Jiaqing, LI Zhong, YAN Mengke, et al. Diagenetic fluid evolution of dolomite from the Lower Ordovician in Tazhong area, Tarim Basin: Clumped isotopic evidence[J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(1): 68–82.
- [163] JIANG Lei, SHEN Anjiang, WANG Zichen, et al. U - Pb geochronology and clumped isotope thermometry study of Neoproterozoic dolomites from China[J]. *Sedimentology*, 2022, 69(7): 2925–2945.
- [164] 李平平, 王淳, 邹华耀, 等. 团簇同位素在白云岩化流体恢复中的应用与局限性[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(3): 738–746.
- LI Pingping, WANG Chun, ZOU Huayao, et al. Application of clumped isotopes to restoration of dolomitizing fluids and its limitations[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(3): 738–746.
- [165] PAN Liyin, SHEN Jiangng, ZHAO Jianxin, et al. LA-ICP-MS U-Pb geochronology and clumped isotope constraints on the formation and evolution of an ancient dolomite reservoir: The Middle Permian of northwest Sichuan Basin (SW China)[J]. *Sedimentary Geology*, 2020, 407: 105728.
- [166] WANG Rui, XIAO Yang, YU Kefu, et al. Temperature regimes during formation of Miocene island dolostones as determined by clumped isotope thermometry: Xisha Islands, South China Sea[J]. *Sedimentary Geology*, 2022, 429: 106079.
- [167] LU Chaojin, ZOU Huayao, WANG Guangwei, et al. Clumped isotopes of paired dolomite and calcite constraining alteration histories of ancient carbonate successions[J]. *Chemical Geology*, 2023, 617: 121264.
- [168] LU Chaojin, KOESHIDAYATULLAH A, LI Fei, et al. A clumped isotope diagenetic framework for the Ediacaran dolomites: Insights to fabric-specific geochemical variabilities[J]. *Sedimentology*, 2024, 71(2): 546–572.
- [169] LU Chaojin, SWART P K. The application of dual clumped isotope thermometer (Δ_{47} and Δ_{48}) to the understanding of dolomite formation[J]. *Geology*, 2024, 52(1): 56–60.
- [170] 沈安江, 胡安平, 程婷, 等. 激光原位U-Pb同位素定年技术及其在碳酸盐岩成岩-孔隙演化中的应用[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(6): 1062–1074.
- SHEN Anjiang, HU Anping, CHENG Ting, et al. Laser ablation in situ U-Pb dating and its application to diagenesis-porosity evolution of carbonate reservoirs[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(6): 1062–1074.
- [171] 沈安江, 赵文智, 胡安平, 等. 碳酸盐矿物定年和定温技术及其在川中古隆起油气成藏研究中的应用[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(3): 476–487.
- SHEN Anjiang, ZHAO Wenzhi, HU Anping, et al. The dating and temperature measurement technologies for carbonate minerals and their application in hydrocarbon accumulation research in the paleo-uplift in central Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(3): 476–487.
- [172] 周进高, 于洲, 吴东旭, 等. 基于激光U-Pb定年技术的白云岩储集层形成过程恢复——以鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组为例[J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49(2): 285–295.
- ZHOU Jingao, YU Zhou, WU Dongxu, et al. Restoration of formation processes of dolomite reservoirs based on laser U-Pb dating: A case study of Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(2): 285–295.
- [173] 乔占峰, 张峭楠, 沈安江, 等. 基于激光U-Pb定年的埋藏白云岩形成过程——以塔里木盆地永安坝剖面下奥陶统蓬莱坝组为例[J]. *岩石学报*, 2020, 36(11): 3493–3509.
- QIAO Zhanfeng, ZHANG Shaonan, SHEN Anjiang, et al. Laser ablated U-Pb dating-based determination of burial dolomitization process: A case study of Lower Ordovician Penglaiba Formation of Yonganba Outcrop in Tarim Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2020, 36(11): 3493–3509.
- [174] 沈安江, 胡安平, 郑剑锋, 等. 基于U-Pb同位素年龄和团簇同位素(Δ_{47})温度约束的构造—埋藏史重建——以塔里木盆地阿克苏地区震旦系奇格布拉克组为例[J]. *海相油气地质*, 2021, 26(3): 200–210.
- SHEN Anjiang, HU Anping, ZHENG Jianfeng, et al. Reconstruction of tectonic-burial evolution based on the constraints of laser in situ U-Pb date and clumped isotopic temperature: A case study from Sinian Qigebulak Formation in Akesu area, Tarim Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2021, 26(3): 200–210.
- [175] 胡安平, 沈安江, 梁峰, 等. 激光铀铅同位素定年技术在塔里

- 木盆地肖尔布拉克组储层孔隙演化研究中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(1): 37-49.
- HU Anping, SHEN Anjiang, LIANG Feng, et al. Application of laser in-situ U-Pb dating to reconstruct the reservoir porosity evolution in the Cambrian Xiaerbulake Formation, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(1): 37-49.
- [176] QIAO Zhanfeng, SHEN Anjiang, ZHANG Shaonan, et al. Origin of giant Ordovician cavern reservoirs in the Halahatang oil field in the Tarim Basin, northwestern China [J]. AAPG Bulletin, 2023, 107(7): 1105-1135.
- [177] 马晓宁. 碳酸盐岩Mg同位素分析方法及研究进展[J]. 地质学刊, 2023, 47(4): 428-437.
- MA Xiaoning. Methods and research progress of Mg isotope analysis in carbonate rocks [J]. Journal of Geology, 2023, 47(4): 428-437.
- [178] GALY A, BAR-MATTHEWS M, HALICZ L, et al. Mg isotopic composition of carbonate: insight from speleothem formation [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2002, 201(1): 105-115.
- [179] HIGGINS J A, SCHRAG D P. Constraining magnesium cycling in marine sediments using magnesium isotopes [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2010, 74(17): 5039-5053.
- [180] HUANG Kangjun, SHEN Bing, LANG Xianguo, et al. Magnesium isotopic compositions of the Mesoproterozoic dolostones: Implications for Mg isotopic systematics of marine carbonates [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2015, 164: 333-351.
- [181] PENG Yang, SHEN Bing, LANG Xianguo, et al. Constraining dolomitization by Mg isotopes: A case study from partially dolomitized limestones of the Middle Cambrian Xuzhuang Formation, North China [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2016, 17(3): 1109-1129.
- [182] 李茜, 朱光有, 李婷婷, 等. 塔里木盆地鹰山组白云岩成因与Mg同位素证据[J]. 地学前缘, 2023, 30(4): 352-375.
- LI Xi, ZHU Guangyou, LI Tingting, et al. Genesis of dolostone of the Yingshan Formation in Tarim Basin and Mg isotope evidence [J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(4): 352-375.
- [183] 李茜, 朱光有, 李婷婷, 等. 川中地区寒武系洗象池组白云岩Mg同位素特征与成因机制[J]. 石油学报, 2022, 43(11): 1585-1603.
- LI Xi, ZHU Guangyou, LI Tingting, et al. Mg isotopic characteristics and genetic mechanism of dolomite of Cambrian Xixiangchi Formation in central Sichuan Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(11): 1585-1603.
- [184] 朱光有, 李茜. 白云岩成因类型与研究方法进展[J]. 石油学报, 2023, 44(7): 1167-1190.
- ZHU Guangyou, LI Xi. Progress in genetic types and research methods of dolomite [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(7): 1167-1190.
- [185] 朱光有, 李茜, 李婷婷, 等. 镁同位素示踪白云石化流体迁移路径——以四川盆地石炭系黄龙组为例[J]. 地质学报, 2023, 97(3): 753-771.
- ZHU Guangyou, LI Xi, LI Tingting, et al. Magnesium isotope trace dolomitization fluid migration path: A case study of the Carboniferous Huanglong Formation in the Sichuan Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2023, 97(3): 753-771.
- [186] 朱光有, 李茜, 李婷婷, 等. 塔里木盆地震旦纪-寒武纪之交白云岩成因机理及Mg同位素差异[J]. 中国科学: 地球科学, 2023, 53(2): 319-344.
- ZHU Guangyou, LI Xi, LI Tingting, et al. Genesis mechanism and Mg isotope difference between the Sinian and Cambrian dolomites in Tarim Basin [J]. Science China Earth Sciences, 2023, 53(2): 319-344.
- [187] TEICHERT S, WOELKERLING W, MUNNECKE A. Coralline red algae from the Silurian of Gotland indicate that the order corallinales (Corallinophycidae, Rhodophyta) is much older than previously thought [J]. Palaeontology, 2019, 62(4): 599-613.
- [188] NEMRA A, OUALI MEHADJI A, MUNNECKE A, et al. Carbonate concretions in Miocene mudrocks in NW Algeria: Types, geochemistry, and origins [J]. Facies, 2019, 65(2): 17.
- [189] FARQUHAR J, WING B A. Multiple sulfur isotopes and the evolution of the atmosphere [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2003, 213(1/2): 1-13.
- [190] JOHNSTON D T, FARQUHAR J, WING B A, et al. Multiple sulfur isotope fractionations in biological systems: A case study with sulfate reducers and sulfur disproportionators [J]. American Journal of Science, 2005, 305(6/8): 645-660.
- [191] SANSJOFRE P, CARTIGNY P, TRINDADE R I F, et al. Multiple sulfur isotope evidence for massive oceanic sulfate depletion in the aftermath of Snowball Earth [J]. Nature Communications, 2016, 7(1): 12192.
- [192] KUNZMANN M, BUI T H, CROCKFORD P W, et al. Bacterial sulfur disproportionation constrains timing of Neoproterozoic oxygenation [J]. Geology, 2017, 45(3): 207-210.
- [193] WU Nanping, FARQUHAR J, FIKE D A. Ediacaran sulfur cycle: Insights from sulfur isotope measurements ($\Delta^{33}\text{S}$ and $\delta^{34}\text{S}$) on paired sulfate-pyrite in the Huqf Supergroup of Oman [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2015, 164: 352-364.
- [194] LUO Genming, RICHOS S, VAN DE SCHOOTBRUGGE B, et al. Multiple sulfur-isotopic evidence for a shallowly stratified ocean following the Triassic-Jurassic boundary mass extinction [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2018, 231: 73-87.

(编辑 张亚雄)